

Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze

Teil 1.2

Einführung in die Planung und Analyse

Ausgabe 0.5, 16.08.2023
Autor: Stephan Rupp

Kontakt: stephan.rupp@srupp.de
Web: <https://www.srupp.de>

Veröffentlicht unter [CC-BY-SA](#)

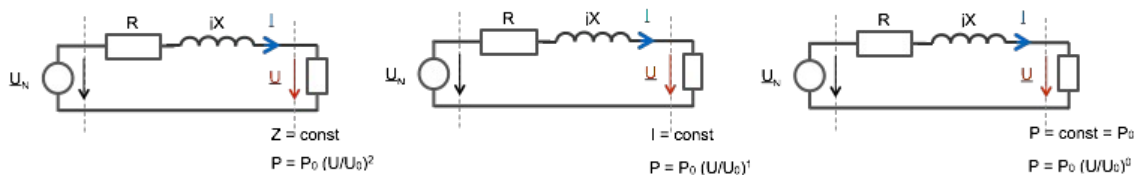
Inhaltsverzeichnis

1. Betriebsmittel und Lastflüsse.....	4
1.1. Lasten.....	4
1.2. Zeigerdiagramme für Verbraucher.....	6
1.3. Zeigerdiagramme für Erzeuger.....	9
1.4. Lastflussanalyse.....	12
1.5. Straßenzug.....	12
1.6. Einfaches Netz.....	13
2. Seminararbeit.....	16
2.1. Wohnanlage mit eigener Erzeugung.....	16
2.2. Freies Thema.....	20
3. Lastflussregelung.....	21
3.1. Maschen im Übertragungsnetz.....	21
3.2. Einführung eines Lastflussreglers.....	22
3.3. Berechnung der Lastflüsse.....	25
3.4. Vertiefung als Seminararbeit.....	29
4. Leitungen und Kompensation.....	31
4.1. PI-Ersatzschaltung.....	31
4.2. Erweiterte Ersatzschaltung.....	34
4.3. Serienkompensation und Parallelkompensation.....	37
4.4. Vertiefung als Seminararbeit.....	41
5. Anlagen am Netz.....	42
5.1. Gewerbezentrum.....	42
5.2. Gleichstromsysteme am Gleichspannungsnetz.....	44
5.3. Regelungskonzepte.....	47
5.4. Vertiefung als Seminararbeit.....	50
6. Musternetz.....	51
6.1. Niederspannung.....	51
6.2. Mittelspannung.....	51
6.3. Hochspannung.....	51
6.4. Höchstspannung.....	52

1. Betriebsmittel und Lastflüsse

1.1. Lasten

Je nachdem, ob eine Last elektronisch geregelt ist, oder sich passiv als Impedanz verhält, ergibt sich eine andere Abhängigkeit von der Netzspannung. Eine auf konstante Wirkleistung P geregelte Last wird überhaupt nicht auf Änderungen der Spannung reagieren ($P = P_0 = \text{konstant}$). Bei einer Last mit Stromregelung ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Spannung ($P = U I = P_0 U/U_0$). Bei einer Impedanz ändert sich die aufgenommene Leistung quadratisch mit der Spannung ($P = U I = U^2 / |Z| = P_0 (U/U_0)^2$). Folgende Abbildung zeigt diese drei Fälle.



In PowerFactory lässt sich eine Last in diesen drei Kombinationen angeben. Hierbei sind auch gemischte Lasten möglich, die alle diese Optionen enthalten. Das Lastmodell bei PowerFactory folgt folgender Logik:

$$P = P_0 [a_P (U/U_0)^{eaP} + b_P (U/U_0)^{ebP} + (1 - a_P - b_P) (U/U_0)^{ecP}] \quad (1.1.1)$$

$$Q = Q_0 [a_Q (U/U_0)^{eaQ} + b_Q (U/U_0)^{ebQ} + (1 - a_Q - b_Q) (U/U_0)^{ecQ}] \quad (1.1.2)$$

Es werden hier zugleich alle drei genannten Fälle ermöglicht. Wenn der Koeffizient a_P den Anteil der Konstanten Leistung beschreibt (mit Exponent $eaP = 0$), so kann der Koeffizient b_P den Anteil der stromgeregelten Leistung beschreiben (mit Exponent $ebP = 1$). Sind a_P und b_P bereits definiert, so verbleibt wegen $a_P + b_P + c_P = 1$ für den Koeffizienten $c_P = 1 - a_P - b_P$. Mit Hilfe dieses letzten Anteil lässt sich nach der Konvention der impedanzabhängige Teil der Leistung beschreiben, wenn man für den Koeffizienten $c_P = 2$ einsetzt.

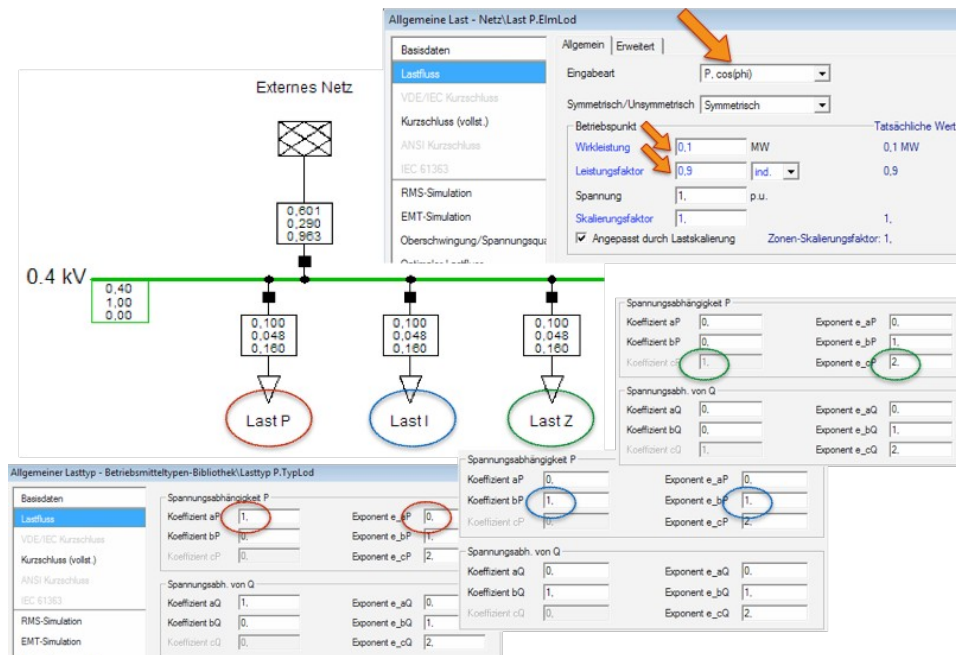
Für die Blindleistung wird das gleiche Vorgehen gewählt (Gleichung 1.1.2). In folgendem praktischen Beispiel wurden drei einzelne Lasten definiert, von denen jeweils eine dem Verhalten $P = \text{konstant}$, $I = \text{konstant}$, bzw. $Z = \text{konstant}$ entspricht.

In folgender Abbildung wurde in PowerFactory zunächst eine Sammelschiene generiert. In die Sammelschiene speist ein Netz ein, das in dieser Abstraktion einer geregelten Spannungsquelle im Sinne einer idealen Spannungsquelle entspricht, wie in der Ersatzschaltung oben. Zunächst werden drei Lasten direkt an die Sammelschiene angeschlossen.

Die Einstellung der Lasten (Eingabeart im Fenster) wird als „P, cos(φ)“ vorgegeben, man kann also auf diese Weise P_0 und den Leistungsfaktor $\cos(\phi)$ als Winkel zwischen Strom und Spannung über der Last. Auf diese Art kann man sich auf die Wirkleistung konzentrieren und die Blindleistung in Abhängigkeit der Wirkleistung vorgeben.

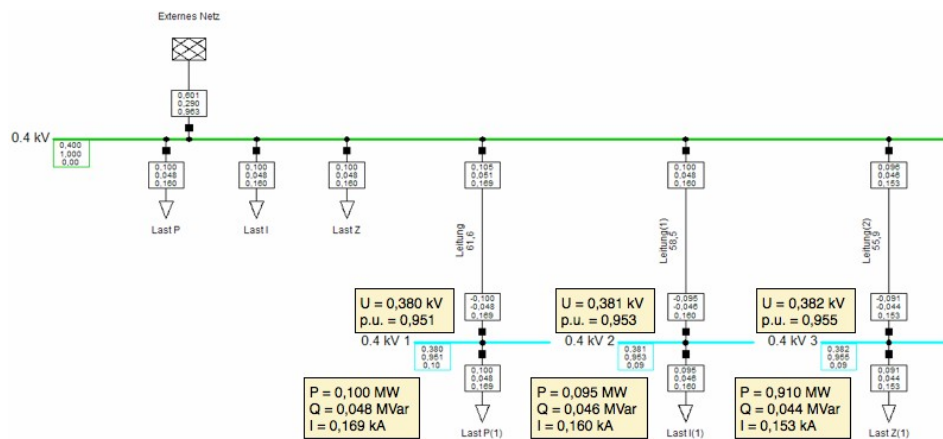
Eine der Lasten wird nun so parametrisiert, dass sie einem Verbraucher mit Leistungsregelung entspricht (somit $P = \text{konstant}$, also $a_P = 1$ und den zugehörigen Koeffizienten $eaP = 0$). Die restlichen Einstellungen bei der Wirkleistung sind somit definiert (da b_P und c_P somit gleich Null sind, interessieren deren Exponenten nicht weiter). Für die Blindleistung wurde das gleiche Verhalten vorgegeben. Die zweite Last wurde sinngemäß auf diese Weise als Last mit Stromregelung eingestellt, die dritte Last als Last mit konstanter Impedanz.

Zwischen zwei Umspannstationen im Übertragungsnetz sind zwei Leitungen über unterschiedliche Trassen geführt, so dass die Leitungslängen unterschiedlich sind. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung.



Betreibt man die Lasten unmittelbar an der Sammelschiene, so erkennt man kein unterschiedliches Verhalten. Mangels Leitungsimpedanz sind die Lasten ja unmittelbar an der Spannungsquelle angeschlossen. Im Ersatzschaltbild in der Abbildung auf der vorherigen Seite würde die ideale Spannungsquelle die Spannung halten. Es ergibt sich somit keine Variation der Leistung mit der Spannung.

Um mit der Ersatzschaltung vergleichbare Verhältnisse zu erzielen, wird das Modell so erweitert, dass die Lasten nun über Leitungen verbunden werden. PowerFactory enthält eine Bibliothek gängiger Kabeltypen mit realistischen Impedanzbelägen. In diesem Fall wurde ein Erdkabel gewählt und eine Länge von 300 m vorgegeben. Eine Lastflussanalyse zeigt nun deutliche Unterschiede im Verhalten der Lasten.



Last 1 mit geregelter Leistung belastet das Netz erwartungsgemäß am stärksten: die Spannung am Ende der Leitung gibt hier auf 0,951 des Sollwertes nach. Im Fall der Last mit geregelterm Strom gibt die Spannung über der Leitung weniger nach.

Aus dem Leiterstrom von $I = 144$ Ampere und der Leiterspannung (Leiter-zu-Leiter-Spannung) von $U = 0,4$ kV berechnet man die gesamten Leistung $P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U = 0,1$ MW. Dass der Wert bei der Last an der Sammelschiene links oben in der Abbildung höher ist, liegt an dem gewählten Blindleistungsanteil durch $\cos(\phi) = 0,9$. Stellt man $\cos(\phi) = 1$ ein, ergibt sich ein Wert von $I = 144$ A.

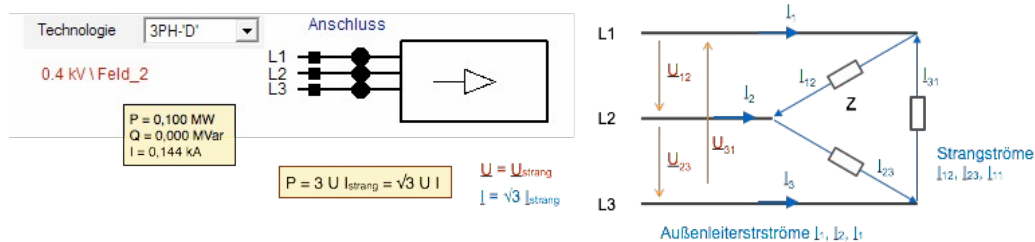
Am Ende der Leitung erreicht die auf konstante Leistung geregelte Last ihr Ziel auf Kosten der Ströme und Spannungen aus dem Netz. Die stromgeregelter Last bzw. die rein passive Impedanz haben wesentlich geringeren Einfluss auf die Spannungen und Ströme.

Frage 1.1.1: Vollziehen Sie das Beispiel mit Power Factory nach. Machen Sie sich bei dieser Gelegenheit mit der Bedienung von PowerFactory vertraut.

Frage 1.1.2:

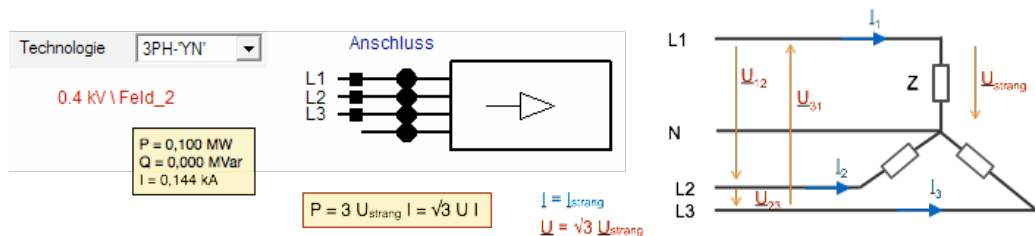
Frage 1.1.3: Dreieckschaltung. Im Beispiel war die Last in einer Dreieckschaltung realisiert. Welche Beziehung besteht zwischen der Leiterspannung und der Strangspannung, sowie zwischen dem dem Leiterstrom und dem Strangstrom? Wie groß ist die gesamte Leistung? Warum ist es sinnvoll, dass das Planungswerkzeug die Leiterspannung, den Leiterstrom und die gesamte Leistung anzeigt?

Lösung:



Frage 1.1.4: Sternschaltung. Welche Beziehung besteht zwischen der Leiterspannung und der Strangspannung, sowie zwischen dem dem Leiterstrom und dem Strangstrom? Wie groß ist die gesamte Leistung? Welche Unterschiede zur Dreieckschaltung gibt es in der Leistung bei gleichen Impedanzen in den Strängen? Wie groß sind die Impedanzen in den Strängen im Vergleich zur Dreieckschaltung bei gleicher Gesamtleistung? Warum ist es sinnvoll, dass das Planungswerkzeug die Leiterspannung, den Leiterstrom und die gesamte Leistung anzeigt?

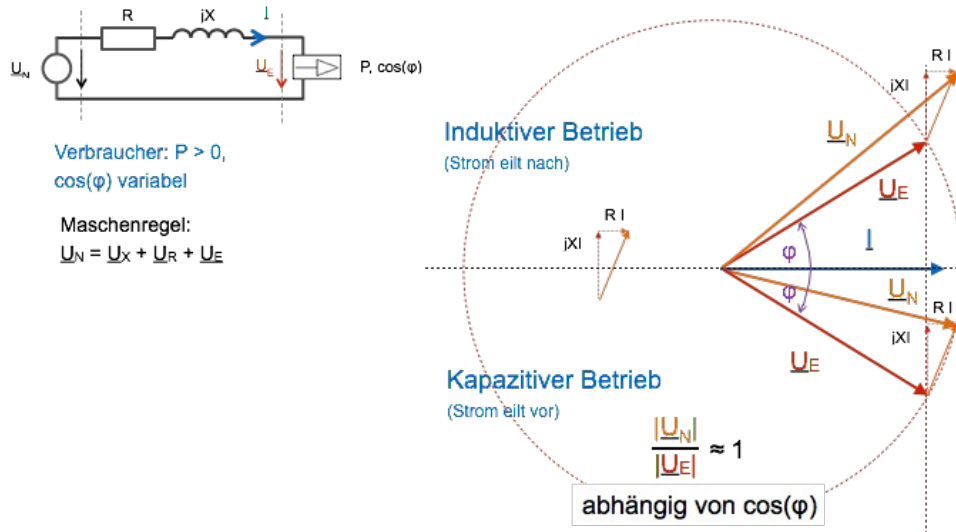
Lösung:



1.2. Zeigerdiagramme für Verbraucher

Ein Verbraucher mit Leistung P und Leistungsfaktor $\cos(\phi)$ wird an einer Leitung betrieben. Die Leitung sei durch die Reaktanz X und den Leitungsverlust R beschrieben. Folgende Abbildung zeigt die Ersatzschaltung und das Zeigerdiagramm im Verbraucherzählpfeilsystem.

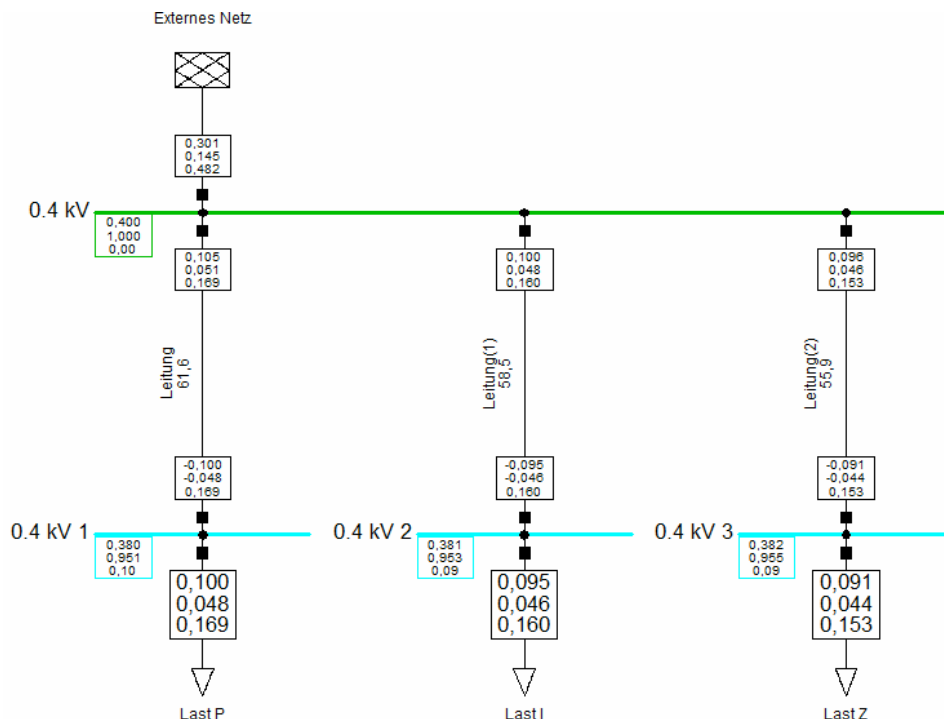
Im Verbraucherzählpfeilsystem bedeutet eine positive Leistung $P = U I > 0$, dass Leistung aufgenommen wird. Im Ersatzschaltbild fällt über dem Widerstand R die Spannung $U_R = R I$ ab. Unabhängig von der Wahl des Zählpfeils für den Strom ist diese Spannung gleichphasig mit dem Strom, d.h. $P_R = U_R I > 0$. Für die Last gilt, dass $P = U_E I \cos(\phi) > 0$, d.h. es wird Leistung aufgenommen. Hierbei bedeuten U_E den Betrag des Effektivwertes der Spannung über der Last, und I der Betrag des Effektivwertes des Stroms.



Hinweis: Zur Berechnung der Zeigerdiagramme in Abhängigkeit der Lastvorgabe verwenden Sie bitte das [Tabellenwerk](https://www.srupp.de/ENT/ENT_Vorlage.xlsx) zur Vorlesung (https://www.srupp.de/ENT/ENT_Vorlage.xlsx). Mit Hilfe des Zeigerdiagramms lassen sich die Betriebsbereiche der Anlage und die zur Spannungshaltung günstigste Führung der Anlage bzgl. der Blindleistung (bzw. des Lastfaktors) plausibilisieren.

Frage 1.2.1: Wird $\cos(\phi) = 0,9$ gewählt und ϕ positiv, gilt für die Blindleistung $Q = U_E I \sin(\phi) > 0$. Die Last nimmt also Blindleistung auf. Stellen Sie diesen Fall mit PowerFactory nach und rekonstruieren Sie das Zeigerdiagramm aus dem Lastfluss (d.h. aus P und Q).

Lösung: Siehe folgende Abbildung. An der Last angegeben sind jeweils P [MW], Q [MVar] und I [A]. Die Spannung entnimmt man der Anzeige an der Klemmleiste. Für die drei in Abschnitt 1.1 angenommenen Lasten mit Charakter P = const, I = konstant und Z = konstant liest man für P = 0,1 MW und $\cos(\varphi) = 0,9$ folgende Werte ab:



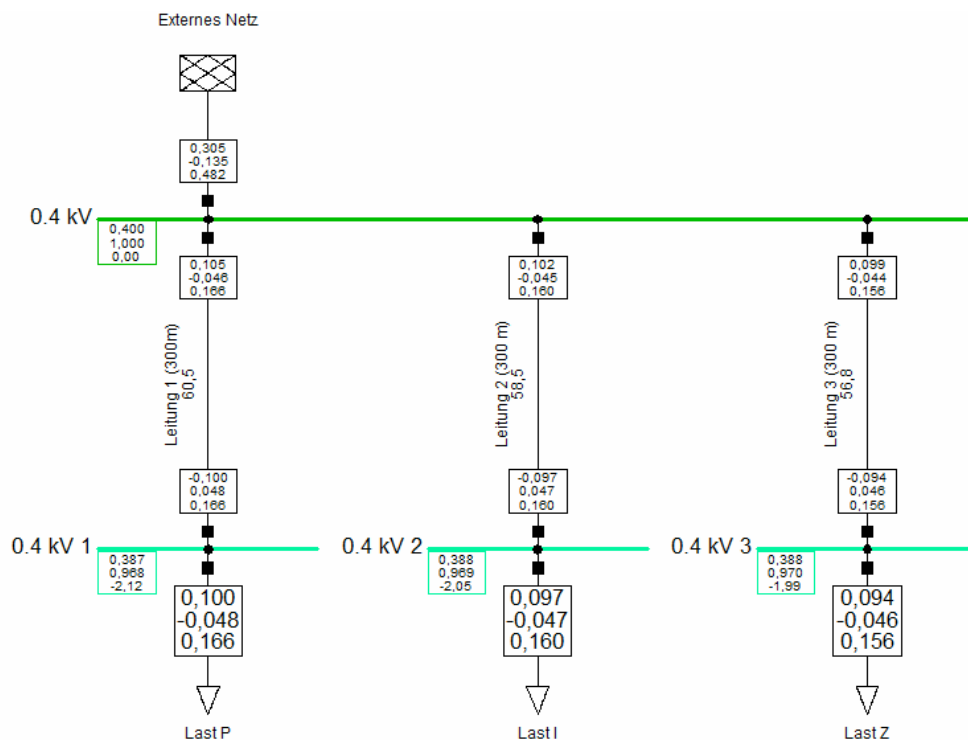
1. Last P = konstant: $U = 0,380 \text{ kV}$, $P = 0,1 \text{ MW}$, $Q = 0,048 \text{ MVar}$, $I = 0,169 \text{ A}$, $u = U/U_N = 0,951 \text{ p.u.}$
2. Last I = konstant: $U = 0,381 \text{ kV}$, $P = 0,1 \text{ MW}$, $Q = 0,046 \text{ MVar}$, $I = 0,160 \text{ A}$, $u = U/U_N = 0,953 \text{ p.u.}$

3. Last Z = konstant: $U = 0,382 \text{ kV}$, $P = 0,1 \text{ MW}$, $Q = 0,044 \text{ MVar}$, $I = 0,153 \text{ A}$, $u = U/U_N = 0,955 \text{ p.u.}$

Die Spannung an Anfang der Leitung wird durch das Netz (als ideale Spannungsquelle) konstant auf $0,4 \text{ kV}$ gehalten. Q ist positiv, es wird also Blindleistung aufgenommen. Die Spannungsverhältnisse $u = U/U_N$ (in p.u. = per unit, d.h. als normierte Größen) werden als mittlere Werte an der Klemmleiste (Sammelschiene) angezeigt.

Frage 1.2.2: Wird $\cos(\phi) = 0,9$ gewählt und ϕ negativ, gilt für die Blindleistung $Q = U_E I \sin(\phi) < 0$. Die Last nimmt also Blindleistung auf. Stellen Sie diesen Fall mit PowerFactory nach und rekonstruieren Sie das Zeigerdiagramm aus dem Lastfluss (d.h. aus P und Q). Hinweis: In diesem Skript wird der Ausdruck Blindleistung für Q verwendet, sowie das Verbraucherzählpfeilsystem, sofern nicht explizit anders angegeben. Ist Q positiv, wird Blindleistung aufgenommen. Ist Q negativ, wird Blindleistung abgegeben. Die Begriffe „positive Blindleistung“, negative Blindleistung“, „induktive Blindleistung“ oder „kapazitive Blindleistung“ finden hier keine Verwendung. Aus-sagen wie z.B. „Drosseln erzeugen induktive Blindleistung“ tragen wenig zur Klarheit bei.

Lösung: Durch Vorgabe von $P = 0,1 \text{ MW}$ und $\cos(\phi) = 0,9$ kapazitiv. Durch die Vorgabe „kapazitiv“ wird das Vorzeichen von ϕ als -1 eingestellt. Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse.



Für die Lasten mit Charakter $P = \text{const}$, $I = \text{konstant}$ und $Z = \text{konstant}$ liest man für $P = 0,1 \text{ MW}$ und $\cos(\phi) = 0,9$ kapazitiv folgende Werte ab:

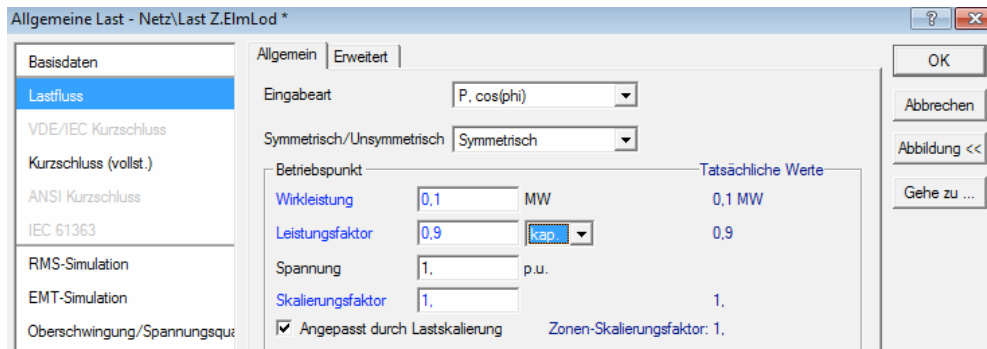
1. Last P: $U = 0,387 \text{ kV}$, $P = 0,1 \text{ MW}$, $Q = -0,048 \text{ MVar}$, $I = 0,166 \text{ A}$, $u = U/U_N = 0,968 \text{ p.u.}$

2. Last I: $U = 0,388 \text{ kV}$, $P = 0,1 \text{ MW}$, $Q = -0,047 \text{ MVar}$, $I = 0,160 \text{ A}$, $u = U/U_N = 0,969 \text{ p.u.}$

3. Last Z: $U = 0,388 \text{ kV}$, $P = 0,1 \text{ MW}$, $-Q = 0,046 \text{ MVar}$, $I = 0,156 \text{ A}$, $u = U/U_N = 0,97 \text{ p.u.}$

Die Spannung an Anfang der Leitung wird durch das Netz (als ideale Spannungsquelle) konstant auf $0,4 \text{ kV}$ gehalten. Q ist negativ, es wird also Blindleistung abgegeben. Die Spannungsverhältnisse $u = U/U_N$ (pu = per unit, d.h. als normierte Größen) sind deutlich besser als in der induktiven Betriebsart der Last. Die Erklärung liefert das Ersatzschaltbild: teilweise Kompensation der Leitungsinduktivität durch den kapazitiven Anteil der Last. Durch geeignete Wahl von $\cos(\phi)$ lässt sich $u = 1$ herstellen.

Die Einstellung der Lasten ist hier nochmals wiedergegeben:



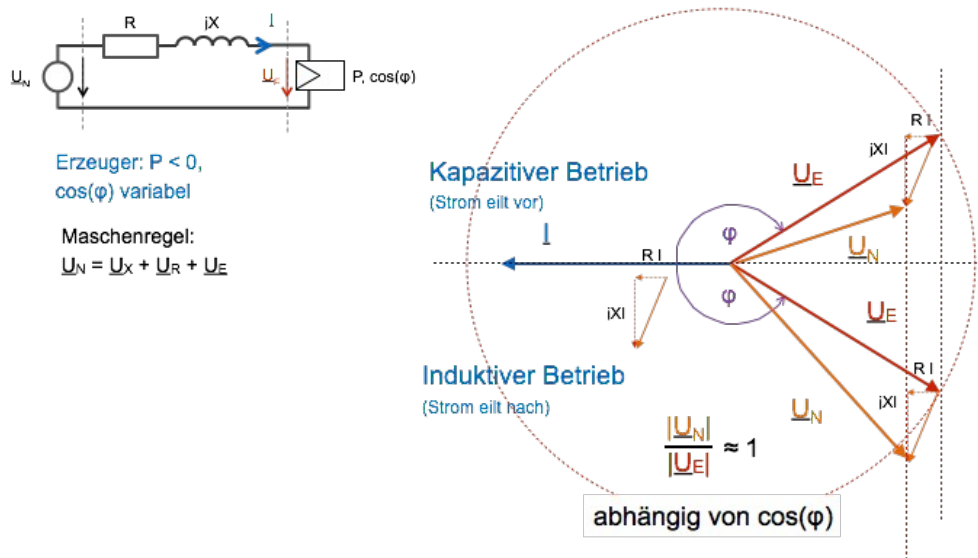
Frage 1.2.3: Spannungshaltung im Netz. Nach der Richtlinie EN 50160 darf die Spannung beim Verbraucher in 95% der Zeit höchstens um -10% bis +10% von der jeweiligen Nennspannung abweichen. Welche Betriebsart ist vorzuziehen?

Lösung: Die Betriebsart mit den geringsten Spannungseinbußen, d.h. die Betriebsart, bei der das Spannungsverhältnis $u = U/U_N$ am nächsten bei 1 ist.

Frage 1.2.4: Lastfluss am Anfang und am Ende der Leitung. Lesen Sie die Angaben am Leitungsanfang und Leitungsende ab. Wieso wechseln die Vorzeichen von P und Q am Ende der Leitung gegenüber dem Leitungsanfang? Wieso stimmen P und Q nicht miteinander überein? Wieso behält der Strom sein Vorzeichen?

1.3. Zeigerdiagramme für Erzeuger

Folgende Abbildung zeigt das Ersatzschaltbild eines an einer Leitung angeschlossenen Erzeugers, sowie das zugehörige Zeigerdiagramm. Die Leitung ist wiederum dargestellt durch ihre Reaktanz X, sowie die ohmschen Leistungsverluste R. Der Erzeuger sei so gewählt, dass seine Wirkleistung P sowie der Leistungsfaktor $\cos(\phi)$ einstellbar ist.



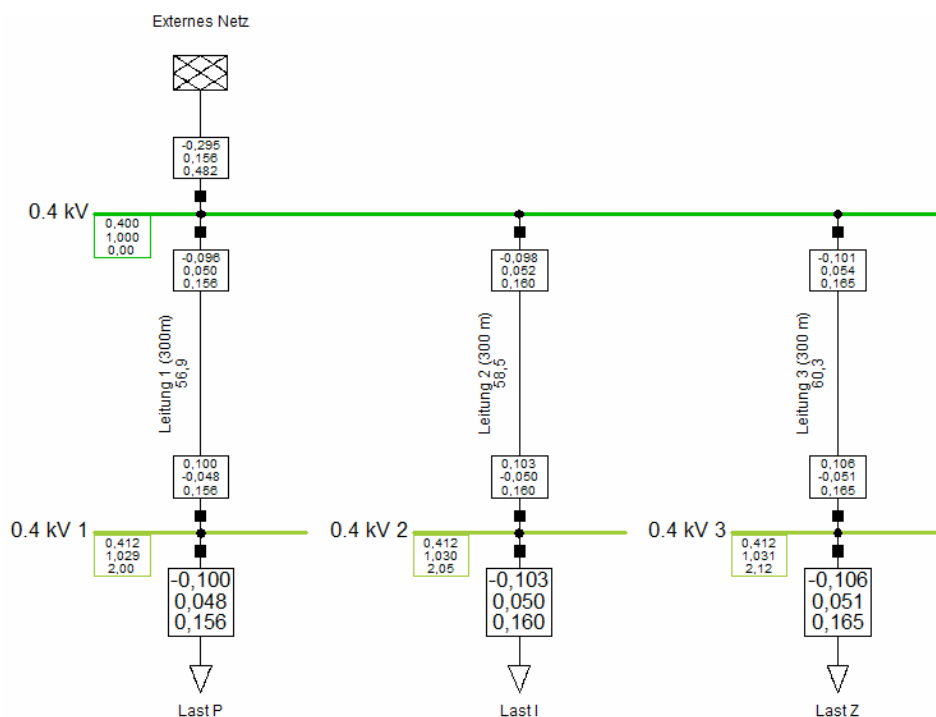
Im Verbraucherzählpfeilsystem ist eine aufgenommene Leistung positiv ($P > 0$), und somit eine abgegebene Leistung negativ ($P < 0$). In der Abbildung oben wurde der Zählpfeil für den Strom so belassen, wie beim Verbraucher in Abschnitt 1.2. Wenn der Erzeuger am Ende der Leitung also Leistung abgeben soll ($P = U_E I \cos(\phi) < 0$), muss der Strom I also negativ sein. Für die Leitungs-impedanz bleiben Wirkleistung und Blindleistung positiv, da die Spannungen dort in Stromrichtung abfallen.

Auch die Maschenregel bleibt wegen der gleichen Richtung des Zählpfeils für den Strom erhalten und ist identisch mit der Maschenregel beim Verbraucher in Abschnitt 1.2. Im Zeigerdiagramm folgen die Spannungen $U_R = R I$ und $U_X = jX I$ der Stromrichtung. Die Leitung wird nun vom Erzeuger gespeist. Der Lastfluss verläuft vom Erzeuger über die Leitung ins Netz.

Frage 1.3.1: Der Phasenwinkel ϕ zwischen Strom und Spannung am Erzeuger sei so gewählt, dass ϕ positiv zwischen $\pi/2 < \phi < \pi$. In diesem Quadranten gilt $\cos(\phi) < 0$ (daher die negative Stromrichtung) und $\sin(\phi) > 0$. Es gilt somit $P = U_E I \cos(\phi) < 0$ und $Q = U_E I \sin(\phi) > 0$. Der Erzeuger gibt also Wirkleistung ab und nimmt Blindleistung auf. Der Strom eilt der Spannung nach, da sich der Phasenwinkel ϕ innerhalb der ersten beiden Quadranten befindet ($0 < \phi < \pi$). Stellen Sie diesen Fall mit PowerFactory nach und rekonstruieren Sie das Zeigerdiagramm aus dem Lastfluss (d.h. aus P und Q). Hinweis: Sie können das Modell aus Abschnitt 1.2 verwenden, indem Sie einfach eine negative Wirkleistung vorgeben. Achtung: Um $Q > 0$ einzustellen, ist der Phasenwinkel in der Betriebsart „kap“ zu wählen. Diese Bezeichnung ist leider irreführend. Da eine Last üblicherweise nicht mit negativer Leistung betrieben wird, war dieser Fall wohl im Lastmodell nicht vorgesehen.

Lösung: Siehe folgende Abbildung. An der Last angegeben sind jeweils P [MW], Q [MVar] und I [A]. Die Spannung sowie das Spannungsverhältnis entnimmt man der Anzeige an der Klemmleiste.

1. Last P: $U = 0,412$ kV, $P = -0,1$ MW, $Q = 0,048$ MVar, $I = 0,156$ A, $u = U/U_N = 1,029$ p.u.
2. Last I: $U = 0,412$ kV, $P = -0,103$ MW, $Q = 0,050$ MVar, $I = 0,160$ A, $u = U/U_N = 1,03$ p.u.
3. Last Z: $U = 0,412$ kV, $P = -0,106$ MW, $Q = 0,051$ MVar, $I = 0,165$ A, $u = U/U_N = 1,031$ p.u.



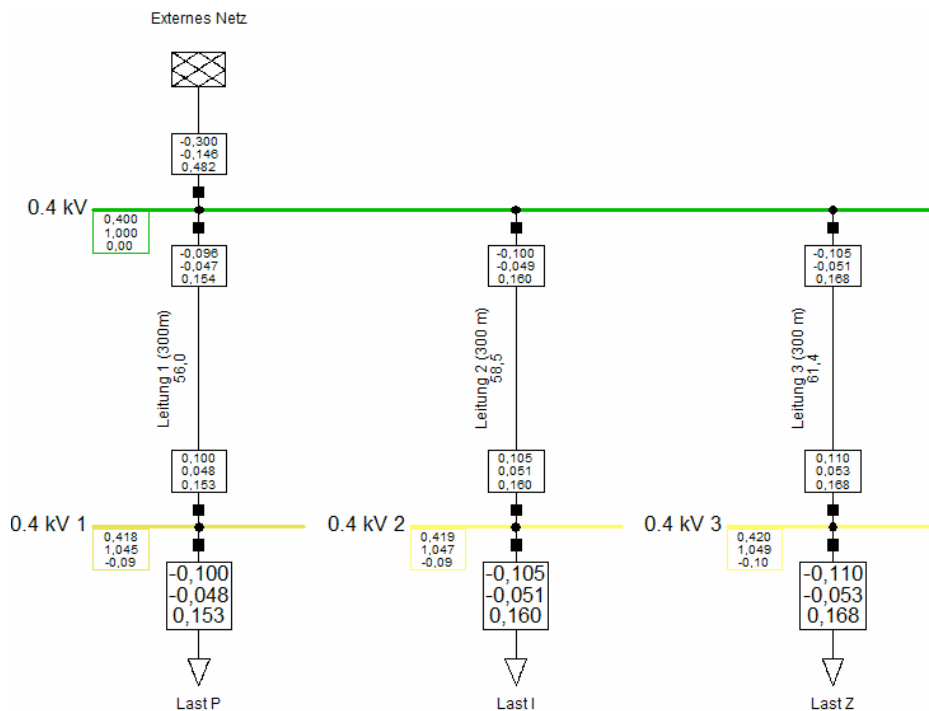
Die Spannung am Anfang der Leitung wird durch das Netz (als ideale Spannungsquelle) konstant auf 0,4 kV gehalten. Q ist positiv, es wird also Blindleistung aufgenommen. Die Spannungsverhältnisse $u = U/U_N$ (in p.u. = per unit, d.h. als normierte Größen) sind nun größer als 1, d.h. Der Erzeuger erhöht die Spannung am Leitungsende über die Nennspannung. Die Spannung erhöht sich um ca 3%.

Frage 1.3.2: Der Phasenwinkel ϕ zwischen Strom und Spannung am Erzeuger sei so gewählt, dass ϕ negativ zwischen $-\pi < \phi < -\pi/2$. In diesem Quadranten gilt $\cos(\phi) < 0$ (daher die negative Stromrichtung) und $\sin(\phi) < 0$. Es gilt somit $P = U_E I \cos(\phi) < 0$ und $Q = U_E I \sin(\phi) < 0$. Der Erzeuger gibt also Wirkleistung und Blindleistung ab. Der Strom eilt der Spannung vor, da sich der Phasenwinkel ϕ inner-

halb der ersten beiden negativen Quadranten befindet ($-\pi < \phi < 0$). Stellen Sie diesen Fall mit Power-Factory nach und rekonstruieren Sie das Zeigerdiagramm aus dem Lastfluss (d.h. aus P und Q). Hinweis: Sie können das Modell aus Abschnitt 1.2 verwenden, indem Sie einfach eine negative Wirkleistung vorgeben. Achtung: Um $Q < 0$ einzustellen, ist der Phasenwinkel in der Betriebsart „ind“ zu wählen.

Lösung: Siehe folgende Abbildung. An der Last angegeben sind jeweils P [MW], Q [MVar] und I [A]. Die Spannung sowie das Spannungsverhältnis entnimmt man der Anzeige an der Klemmleiste.

1. Last P: $U = 0,418 \text{ kV}$, $P = -0,1 \text{ MW}$, $Q = -0,048 \text{ MVar}$, $I = 0,153 \text{ A}$, $u = U/U_N = 1,045 \text{ p.u.}$
2. Last I: $U = 0,419 \text{ kV}$, $P = -0,103 \text{ MW}$, $Q = -0,051 \text{ MVar}$, $I = 0,160 \text{ A}$, $u = U/U_N = 1,047 \text{ p.u.}$
3. Last Z: $U = 0,420 \text{ kV}$, $P = -0,106 \text{ MW}$, $Q = -0,053 \text{ MVar}$, $I = 0,168 \text{ A}$, $u = U/U_N = 1,049 \text{ p.u.}$



Die Spannung an Anfang der Leitung wird durch das Netz (als ideale Spannungsquelle) konstant auf 0,4 kV gehalten. Q ist negativ, es wird also Blindleistung abgegeben. Die Spannungs-verhältnisse $u = U/U_N$ (in p.u. = per unit, d.h. als normierte Größen) sind nun deutlich größer als 1, d.h. der Erzeuger erhöht die Spannung am Leitungsende über die Nennspannung. Die Spannung erhöht sich um ca 5%.

Frage 1.3.3: Spannungshaltung im Netz. Nach der VDE Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 wird empfohlen, dass durch Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz die Netzspannung um nicht mehr als $\Delta U = 3\%$ gegenüber dem Betrieb ohne Erzeugungsanlagen überschritten werden darf. Welche Betriebsart ist vorzuziehen? Was bedeutet diese Betriebsart für das Netz?

Lösung: Die Betriebsart mit den geringsten Spannungserhöhungen, d.h. die Betriebsart, bei der das Spannungsverhältnis $u = U/U_N$ am nächsten bei 1 ist. Im Zeigerdiagramm bzw. aus der Lastflussanalyse geht hervor, dass die Betriebsart, bei der die Erzeuger Blindleistung beziehen ($Q > 0$) günstiger ist. Durch geeignete Wahl von $\cos(\phi)$ lässt sich der Spannungshub minimieren. Bedeutung für das Netz: Für Erzeuger muss Blindleistung bereit gestellt werden.

Frage 1.3.4: Lastfluss am Anfang und am Ende der Leitung. Lesen Sie die Angaben am Leitungsanfang und Leitungsende ab. Wieso wechseln die Vorzeichen von P und Q am Ende der Leitung gegenüber dem Leitungsanfang? Wieso stimmen P und Q nicht miteinander überein?

1.4. Lastflussanalyse

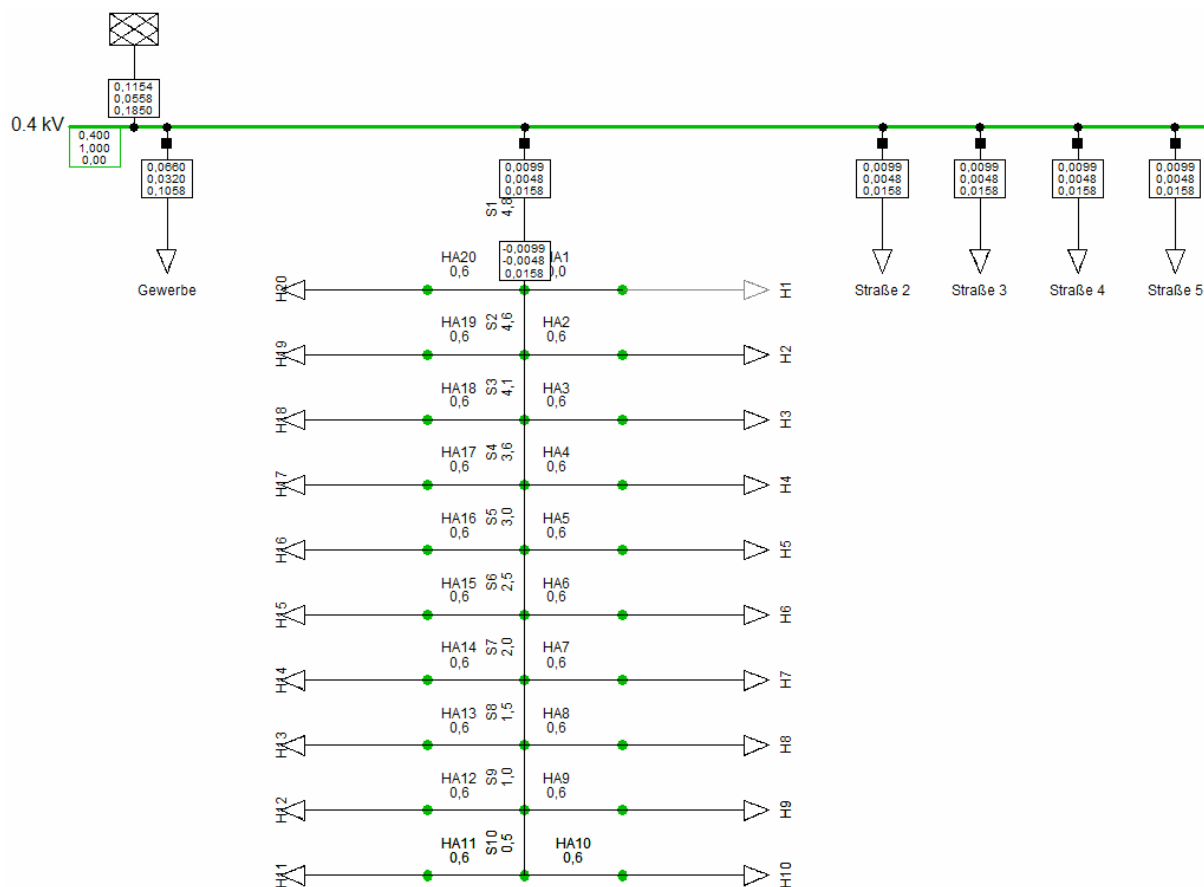
Mit Hilfe von Zeigerdiagrammen und Ersatzschaltbildern verschafft man sich rasch einen Überblick über die Lage, wie z.B. über die Verhältnisse von Strömen, Spannungen, Wirkleistung und Blindleistung. Diese Betrachtung ist jedoch rein qualitativ. Mit Hilfe der Lastflussanalyse von PowerFactory kommt man zu den gleichen Ergebnissen. Allerdings ist diese Betrachtung quantitativ: es werden konkrete Werte der Betriebsmittel vorgegeben und es werden Ströme, Spannungen, Wirkleistung und Blindleistung konkret berechnet.

Frage 1.4.1: Wie berechnen Sie Schaltungen mit nichtlineare Elementen? Beispiel: Eine Gleichspannungsquelle U mit Innenwiderstand R treibt eine Diode in Durchlassrichtung. Die Kennlinie der Diode $I(U)$ ist bekannt. Wie bestimmen Sie den Arbeitspunkt grafisch bzw. rechnerisch?

Frage 1.4.2: Funktionsprinzip der Lastflussanalyse. Im Konsolenfenster von PowerFactory erhalten Sie Meldungen über den Fortschritt des iterativen Newton-Raphson-Verfahrens. Wie funktioniert dieses Verfahren? Erkunden Sie das Funktionsprinzip der Lastflussanalyse.

1.5. Straßenzug

Folgende Abbildung zeigt einen Straßenzug, bestehend aus einem Abgang der Sammelschiene im Niederspannungsnetz mit einer Leitung (Erdkabel), sowie die an der Leitung angeschlossenen Haushalte als Lasten. Es soll Erdkabel vom Typ NAYY 4x150 verwendet werden. Die Länge des Kabels beträgt 200 m. Im Strassenzug sind insgesamt 20 Haushalte angeschlossen. Pro Haushalt wird eine mittlere Leistung von 0,52 kW konsumiert, $\cos(\phi) = 0,9$. Jeder Haushalt ist mit Hilfe einer Kabelmuffe und 8 m Zuleitung vom Typ NAYY 4x50 angeschlossen. Außerdem enthält das Netz einen Gewerbebetrieb der Leistung $P = 66$ kW mit $\cos(\phi) = 0,9$.



Frage 1.5.1: Erzeugen Sie mit Hilfe von PowerFactory ein solches Netz. Hinweis: Gehen Sie schrittweise vor. Erstellen Sie zunächst einen Haushalt mit Anschluss und testen Sie den Lastfluss.

Wenn der Anschluss funktioniert, arbeiten Sie mit „Kopieren“ und „Einsetzen“ (d.h. erweitern per copy und paste).

Frage 1.5.2: Lastflussanalyse. Berechnen Sie den Lastfluss im Netz. Prüfen Sie die Ergebnisse auf Plausibilität.

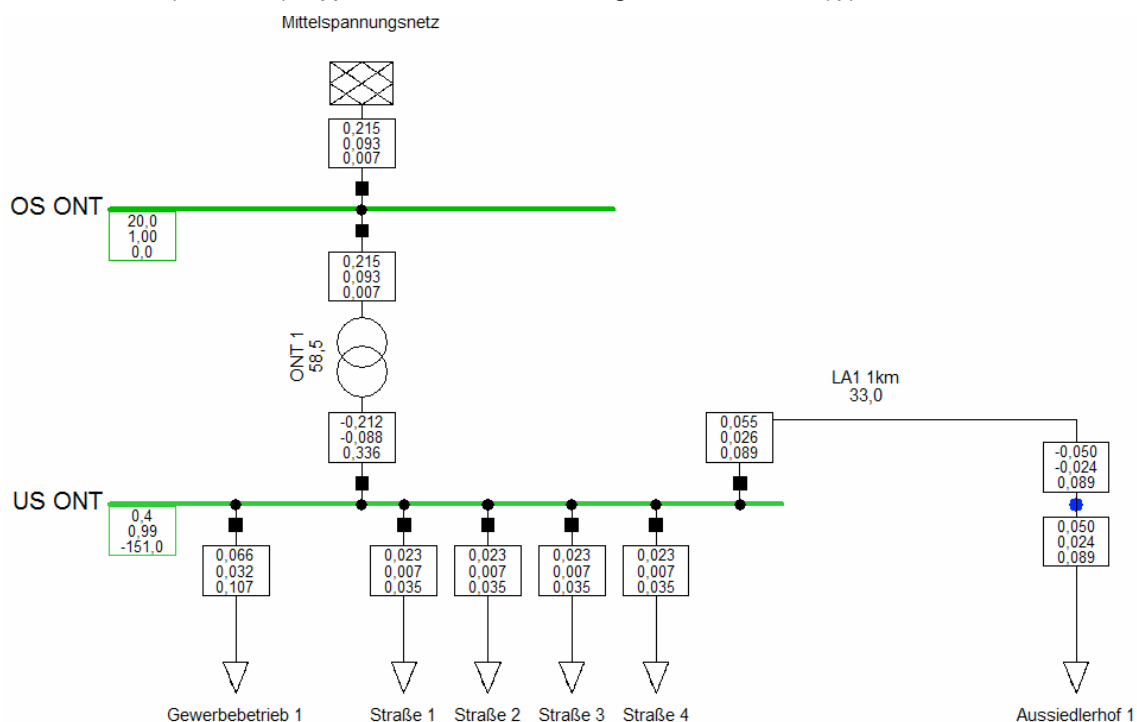
Frage 1.5.3: Welches Verhalten zeigt der Straßenzug am Anfang der Leitung? Wir könnte man den Straßenzug durch eine Punktlast nachbilden?

Frage 1.5.4: Ergänzen Sie das Netz um 4 weitere Straßen, für den Sie die Ersatzschaltung verwenden. Analysieren Sie den Lastfluss.

1.6. Einfaches Netz

Das in folgender Abbildung gezeigte Ortsnetz besteht aus den Komponenten:

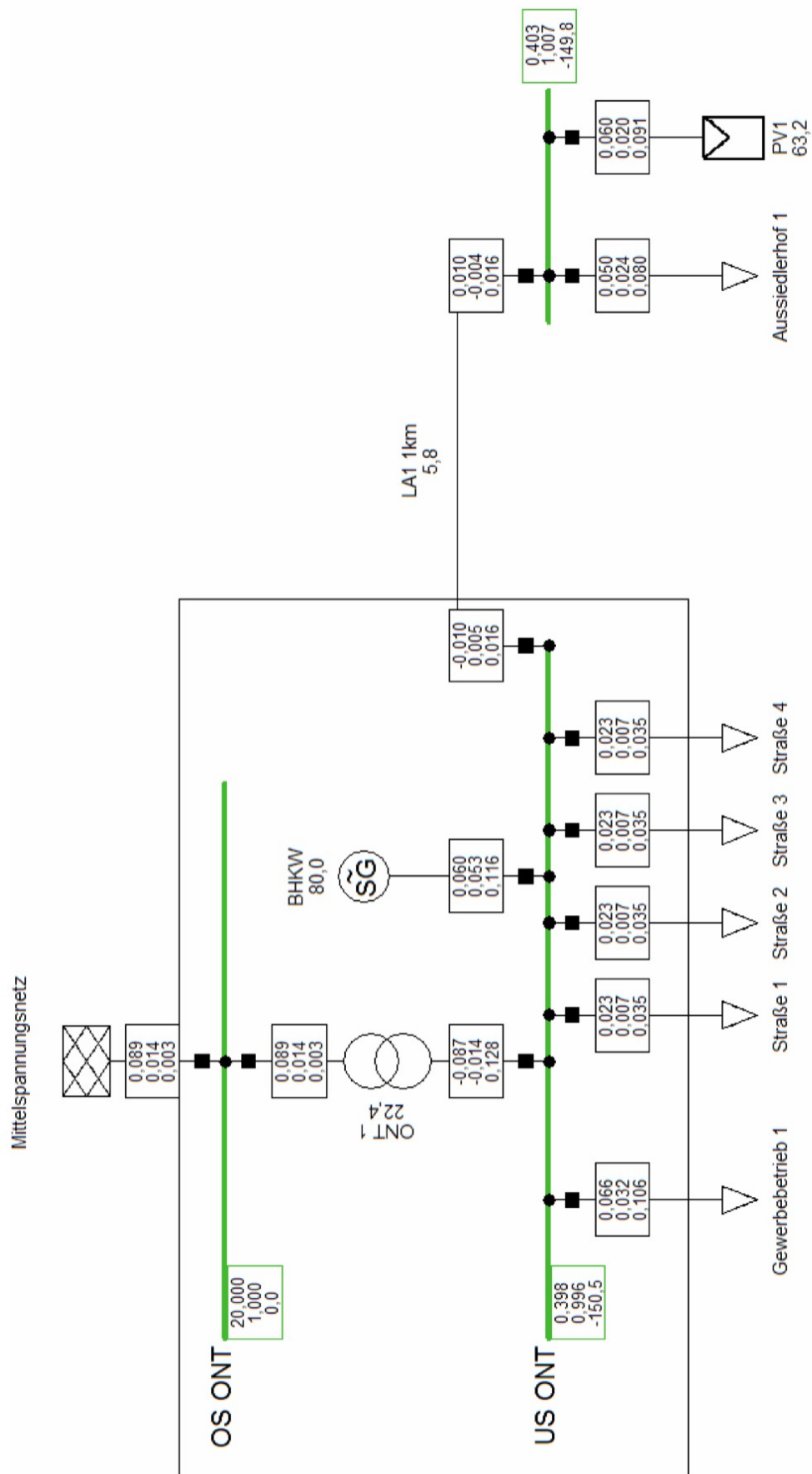
- Speisung aus dem 20 kV Mittelspannungsnetz,
- 1 Ortsnetztransformator mit Scheinleistung $S = 400 \text{ kVA}$, 20/0,4 kV, Typ DOTE SGB,
- 1 Punktlast für einen Gewerbebetrieb, 66 kW, $\cos(\phi) = 0,9$
- 4 Straßenzüge mit jeweils 20 Wohneinheiten als Niederspannungslasten direkt am Orts-netztransformator (ONT), Anschlusswert pro Wohneinheit $S = 12 \text{ kVA}$, $\cos(\phi) = 0,95$, Gleichzeitigkeitsfaktor 0,1.
- Aussiedlerhof mit landwirtschaftlichem Betrieb, angeschlossen über 1 km Leitung (Erdkabel), Typ NAYY 4x 150, Leistung $P = 50 \text{ kW}$, $\cos(\phi) = 0,9$.



Frage 1.6.1: Erstellen Sie das Netz mit Hilfe von PowerFactory. Hinweis: Für die Straßenzüge verwenden Sie die Niederspannungslast aus der Bibliothek (mit Symbol LV = Low Voltage) und folgenden Parametern.

NS-Lasttyp - Betriebsmitteltypen-Bibliothek\NS-Lasttyp.TypLodiv		Variable Last	
Basistypen	Name	Anzahl Wohneinheiten	20
Beschreibung	Max. Last pro Wohneinheit	P/Wohneinheit	1,14 kW
	Leistungsfaktor	Ausnutzungsfaktor	1
	Gleichzeitigkeitsfaktor gmf	Max. Last	72,29907 kVA
		Durchschnittliche Last	24 kVA
		Leistungsfaktor	0,95

- Frage 1.6.2: Photovoltaik im Netz. Auf dem Aussiedlerhof wird eine Photovoltaikanlage installiert. Die Anlage hat eine Leistung von 60 kW. Gemäß der Anschlussrichtlinie VDE-AR-N 4105 müssen Anlagen mit $S > 13,8 \text{ KVA}$ mit variablen $\cos(\phi) = 0,9$ kapazitiv bis $\cos(\phi) = 0,9$ induktiv betrieben werden können, um die Spannung über der Leitung zu halten. Ergänzen Sie die PV-Anlage im Netzmodell und wählen Sie eine günstige Einstellung des Leistungsfaktors $\cos(\phi)$. Untersuchen Sie folgende Arbeitspunkte: die Last am Aussiedlerhof ist außer Betrieb, die Last am Aussiedlerhof ist in Betrieb. Hinweis: Die PV-Anlage wird in PowerFactory als Erzeuger im Erzeugerzählpfeilsystem dargestellt. Zur Transformation ins Verbraucherzählpfeilsystem sind die P und Q in der Ergebnisbox der PV-Anlage einfach mit umgekehrtem Vorzeichen zu interpretieren.
- Frage 1.6.3: Blockheizkraftwerk im Netz. Die Trafostation soll um ein Blockheizkraftwerk (BHKW) erweitert werden, das einen Teil der Strassenzüge mit Fernwärme versorgt. Das BHKW soll wärmegeführt werden, d.h. in erster Linie der Heizung dienen. Wenn das BHKW läuft, wird der erzeugte Strom der ins Netz eingespeist. Das BHKW besitzt eine elektrische Leistung von $P = 60 \text{ kW}$. Erweitern Sie das Netz um ein BHKW. Wählen Sie einen geeigneten Arbeitspunkt für das BHKW (P, Q). Hinweis: Verwenden Sie hierzu eine Synchronmaschine aus der Bibliothek.
- Frage 1.6.4: Lastfluss im Tagesverlauf. Bisher laufen alle Erzeuger und Verbraucher auf mittlerer Leistung. Dieser Arbeitspunkt macht als summarischer Mittelwert Sinn, ist aber im Tagesverlauf nicht typisch. Nachts beispielsweise liefert die PV-Anlage keinen Beitrag. An einem Sommertag ist ein wärmegeführtes BHKW nicht in Betrieb. Nachts sinkt der Bedarf der Haushalte und ggf. der Gewerbebetriebe (abhängig von der Art des Gewerbes wie z.B. Bäckereien, Produktion im Schichtbetrieb). Geben Sie Ihrer Meinung nach repräsentative Vorgaben für die Lastflüsse, z.B. Winternacht, Sommertag, Sommernacht und untersuchen Sie die diesbezüglichen Arbeitspunkte im Modellnetz.



2. Seminararbeit

In der Seminararbeit erstellen Sie mit Hilfe von PowerFactory ein eigenes Netz und untersuchen die Eigenschaften und den Lastfluss. Als Beispiel für den gewünschten Umfang dient das in Abschnitt 2.1 beschriebene Ortsnetz mit eigener Erzeugung. Die in den folgenden Abschnitten ab Kapitel 3 beschriebenen Themen eignen sich ebenfalls für weitergehende Untersuchungen in Ihrer Seminararbeit und sollen als Anregungen hierfür verstanden werden.

Sie sind jedoch in der Wahl Ihres Themas frei. Ihr Thema besprechen Sie bitte mit dem Dozenten. Es ist möglich, ein Thema für die Seminararbeit gemeinsam mit einem Kommilitonen im Kurs zu bearbeiten.

2.1. Wohnanlage mit eigener Erzeugung

Es soll eine neue Wohnsiedlung gebaut werden mit insgesamt 80 Wohneinheiten. Jede Wohneinheit hat 120 m² Wohnfläche, einen jährlichen Bedarf von 3000 kWh elektrischer Energie und einen jährlichen Bedarf von 6500 kWh Wärmeenergie zum Heizen. Die Wohnanlage soll über einen eigenen Ortsnetztransformator an das öffentliche Stromnetz angebunden werden. Außerdem soll die Wohnanlage einen Teil ihrer Energie mit Hilfe eines Blockheizkraftwerkes erzeugen, sowie mit Hilfe von Photovoltaik-Anlagen.

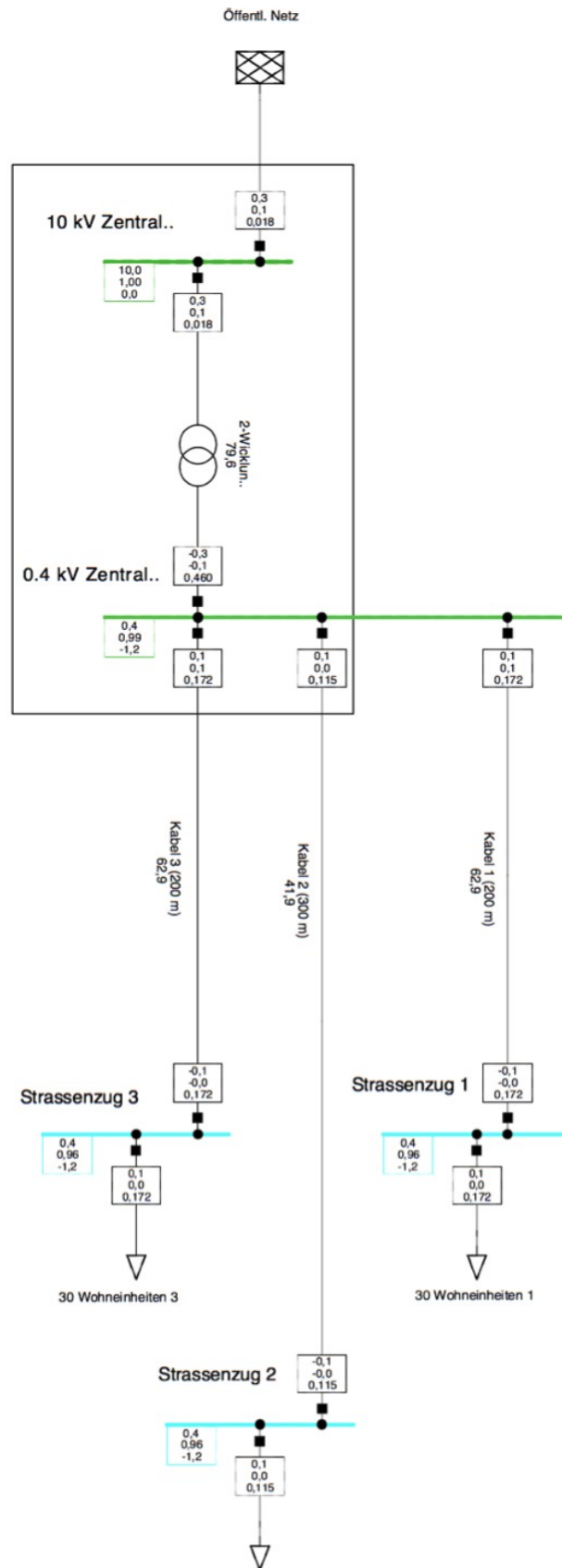
Das Blockheizkraftwerk hat eine Leistung von 50 kW elektrisch plus 80 kW thermisch und soll wärmegeführt betrieben werden. Das Blockheizkraftwerk soll 4000 Betriebsstunden im Jahr erreichen und wird überwiegend im Winter betrieben. Jede Wohneinheit besitzt eine eigene Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) mit 2 kW Spitzenleistung. Pro Jahr schätzt man 950 Betriebsstunden der PV-Anlage mit überwiegendem Anteil im Sommer.

Der vom Blockheizkraftwerk nicht abgedeckte Teil der Wärmeenergie wird aus anderen Energiequellen bezogen (Fernwärme bzw. eigene Heizungen). Das Blockheizkraftwerk und die PV-Anlagen sollen dem Eigenbedarf dienen. Hierdurch nicht abgedeckte Teil der elektrischen Energie wird aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. Überschüssige elektrische Energie wird ins öffentliche Netz eingespeist.

Das Blockheizkraftwerk soll zusammen mit dem Ortsnetztransformator in einer Energiezentrale untergebracht werden. Die Wohneinheiten sind in drei Strassenzüge aufgeteilt. Jeweils 2 Strassenzüge versorgen 30 Wohneinheiten über 200 m Erdkabel. Die verbleibenden 20 Wohneinheiten versorgt ein Strassenzug über 300 m Erdkabel. Pro Wohneinheit rechnet man in der Hauptbetriebsstunde mit einem Leistungsbedarf (mittlerem Anschlusswert) von 3,4 kW. Die PV-Anlagen verteilen sich auf die Wohneinheiten.

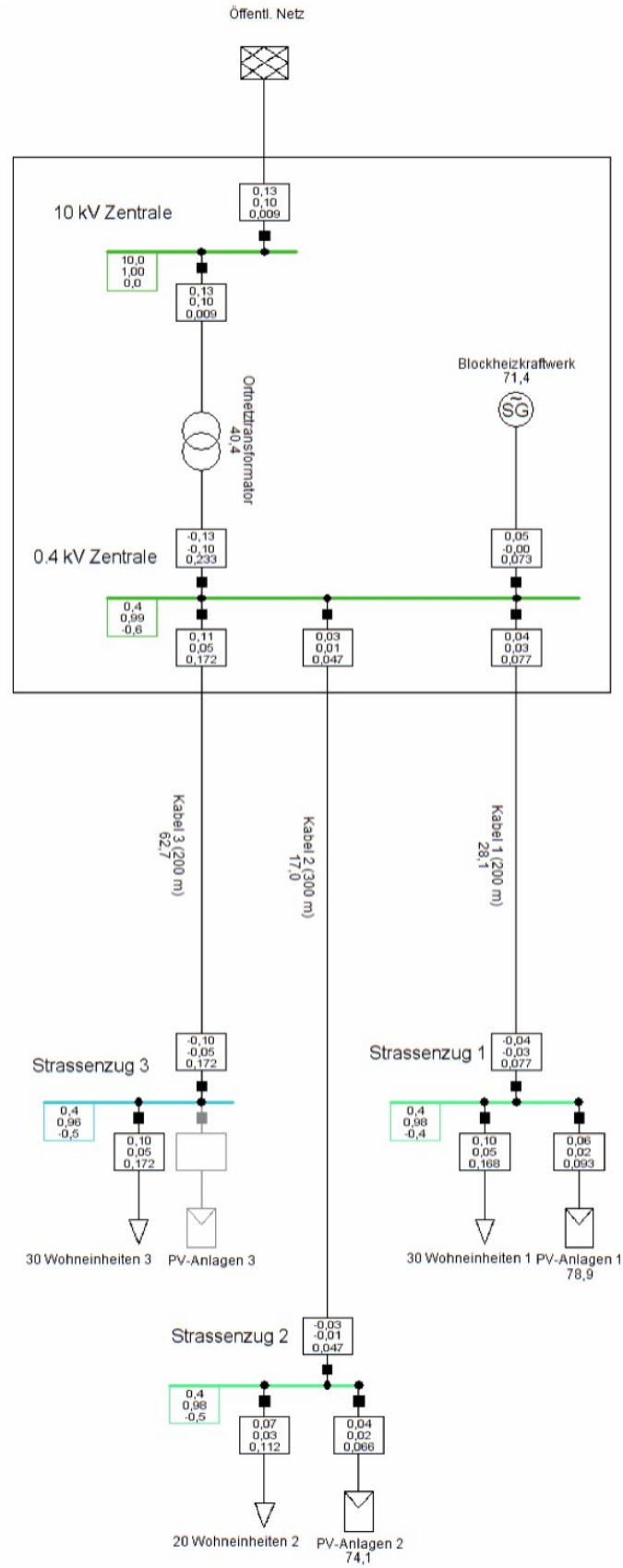
Frage 2.1.1: Jahresbedarf. Welchen Anteil der jährlich benötigten Wärmeenergie kann das Blockheizkraftwerk decken? Welchen Anteil der jährlichen elektrischen Energie deckt das Blockheizkraftwerk? Welchen Anteil der jährlichen elektrischen Energie decken die PV-Anlagen?

Frage 2.1.2: Verbraucherstruktur. Summieren Sie den Bedarf an elektrischer Energie pro Strassenzug. Verwenden Sie hierzu die Werte in der Hauptbetriebsstunde. Skizzieren Sie die Struktur der Wohnanlage mit Energiezentrale und den 3 Strassenzügen. Planen Sie das Netz mit Hilfe des Planungswerkzeugs und analysieren Sie den Lastfluss. Hinweis: Fassen Sie zur Vereinfachung die Verbraucher eines Strassenzuges an einer Punktlast am Ende des Kabels zusammen, mit der gesamten Leistung der Wohneinheiten und $\cos\phi = 0,9$ induktiv. Ergänzen Sie den Ortsnetztransformator und die Anbindung an das Netz. In diesem Szenario werden zunächst nur die Verbraucher betrachtet, d.h. die benötigte elektrische Leistung wird vollständig aus dem öffentlichen Netz bezogen.



Verbraucherstruktur der Wohnanlage

- Frage 2.1.3: Ergänzen Sie die Erzeuger (Blockheizkraftwerk und PV-Anlagen) im Netzmodell. Untersuchen Sie den Einfluss des $\cos\phi$ der PV-Anlagen auf die Spannung am Anfang und am Ende der Kabel. Hinweis: Nach der VDE Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 wird empfohlen, dass durch Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz die Netzspannung um nicht mehr als $\Delta U = 3\%$ gegenüber dem Betrieb ohne Erzeugungsanlagen überschritten werden darf (siehe Abschnitt 3.1 in Teil 1 des Manuskriptes TM60601.1)
- Frage 2.1.4: Untersuchen Sie die Lastflüsse und Spannungshaltung für folgende Szenarien: Szenario 1: Wintertag mit Unterstützung des BHKW, jedoch ohne Sonne (Starklast), sowie Szenario 2: Winternacht (BHKW, Schwachlast). Dokumentieren Sie Ihre Ergebnisse inkl. der Betriebszustände der PV-Anlagen ($\cos\phi$).
- Frage 2.1.5: Untersuchen Sie die Lastflüsse und Spannungshaltung für folgende Szenarien: Szenario 3: Sommertag mit voller PV-Leistung, volles Last, jedoch ohne BHKW. Szenario 4: Ferientag im Sommer (volle PV-Leistung, Schwachlast, kein BHKW). Dokumentieren Sie Ihre Ergebnisse inkl. der Betriebszustände der PV-Anlagen ($\cos\phi$).
- Frage 2.1.6: Regelbarer Ortsnetztransformator. Untersuchen Sie die Einsatzmöglichkeiten eines Laststufenschalters an Ortsnetztransformator (lässt sich im Modell aktivieren). Wäre ein Regelalgorithmus vorteilhaft, der Messwerte aus den Strassenzügen verwendet? Dokumentieren Sie Ihre Ergebnisse.



2.2. Freies Thema

Für Ihrer Seminararbeit wählen Sie bitte ein freies Thema. Inhalt sollte die Planung und Analyse einer Anlage bzw. eines Netzes mit Hilfe des Planungswerkzeugs (Power Factory) sein. Der Ablauf kann dem Thema aus Abschnitt 2 oder den Aufgaben ab Abschnitt 3, bzw. Ihren eigenen Vorstellungen.

Das Beispiel aus 2.1 (Wohnanlage) könnte z.B. folgendermaßen weiter ausgestaltet werden:

- Untersuchung der zeitlichen Auslastung über den Tagesverlauf und Jahresverlauf: Hierzu lassen sich die Standardprofile des BDEW verwenden (finden sich im Web). Standardprofile gibt es für Haushalte, verschiedene Arten von Gewerbebetrieben und landwirtschaftliche Betriebe. Die Profile lassen sich über den Jahresverlauf erweitern (dynamisieren), so dass die Auslastung z.B. im stündlichen Raster über das Jahr gegeben ist. Für die Erzeuger lassen sich ebenfalls Profile im Jahresverlauf erstellen. Die Untersuchung kann bzgl. des Lastflusses markante Betriebsarten zum Ziel haben.
- Wirtschaftliche Betrachtungen: Welcher Anteil an Energie lässt sich im Jahresverlauf in die öffentliche Netze einspeisen? Welche Einkünfte lassen sich hieraus erzielen? Wann wäre eigener Verbrauch günstiger als Einspeisung ins Netz? Welche Erweiterungen der Anlage wären aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll?
- Betrachtung der regulatorischen Rahmenbedingungen: Der Betrieb elektrischer Anlagen und Heizungsanlagen ist durch eine Reihe gesetzlicher und regulatorischer Vorgaben geregelt, die über die Anschlussrichtlinie VDE-AR-N 4105 hinausgehen. Hierzu gehören das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG), das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), die Messsystemverordnung (MsysV), sowie die Mittelspannungsrichtlinie des BDEW (Richtlinie Erzeugungsanlagen am MS-Netz). Wenn Sie Interesse am regulatorischen Umfeld haben, analysieren Sie dieses bitte mit Blick auf die Konsequenzen für den Betrieb der Anlagen im Wohngebiet.

Erweiterungen der Wohnanlage: Erweitern Sie die Wohnanlage z.B. um einen ländlichen Betrieb, eine Anlage zur Winderzeugung, bzw. um eine Biogasanlage, bzw. um einen Energiespeicher. Untersuchen Sie die Auswirkungen auf das Netz.

Hinweis: Für die Erzeugerprofile, Lastprofile und die benötigte Leistung und Energie aus einem Energiespeicher steht Ihnen ein [Tabellenwerk](https://www.srupp.de/ENT/TM20601_Energieversorgung_PV_Wind_Batterie_Netz.ods) zur Verfügung (siehe https://www.srupp.de/ENT/TM20601_Energieversorgung_PV_Wind_Batterie_Netz.ods).

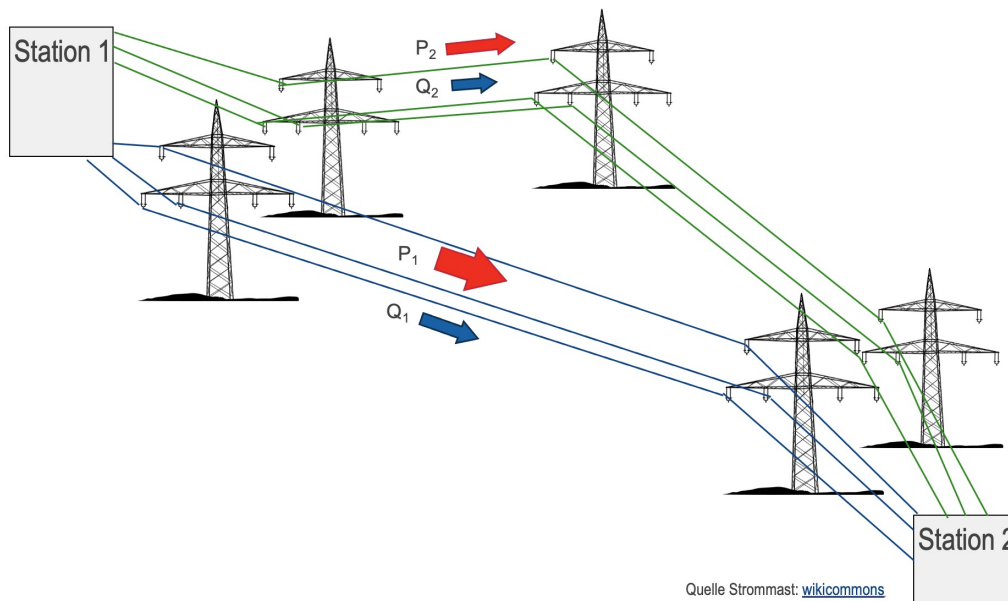
Die folgenden Abschnitte ab Kapitel 3 beschreiben ausgewählte Themen aus den Netzen. Die Effekte und Eigenschaften der Netze werden in den Kapiteln untersucht. Alle Themen lassen sich mit Hilfe von Modellnetzen und Simulationen in PowerFactory im Rahmen Ihrer Seminararbeit vertiefen.

Bitte sprechen Sie Ihr Thema mit dem Dozenten der Vorlesung ab. Dokumentieren Sie Ihr Thema, Ihr Vorgehen und die Ergebnisse in einem Bericht.

3. Lastflussregelung

3.1. Maschen im Übertragungsnetz

Zwischen zwei Umspannstationen im Übertragungsnetz sind zwei Leitungen über unterschiedliche Trassen geführt, so dass die Leitungslängen unterschiedlich sind. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung.



Leitung 2 führt über den längeren Weg als Leitung 1. Beide Leitungen sind in der Bauart und in ihren physikalischen Eigenschaften gleich. An Station 2 wird eine gegebene Leistung abgeführt.

Frage 3.1.1: Lastfluss. Welcher Lastfluss stellt sich ein? Welche Leitung transportiert mehr Wirkleistung? Welche Leitung benötigt an Station 1 die größte Blindleistung?

Lösung: (1) Die Last teilt sich auf beiden Leitungen auf. (2) Die kürzere Leitung transportiert mehr Leistung. (3) Die Blindleistung ist abhängig vom Strom und von der Leitungsreaktanz ($Q = X I^2$). Bei gleichen Strömen benötigt die längere Leitung mehr Blindleistung. Hier überwiegt allerdings der Strom: die kürzere Leitung benötigt mehr Blindleistung.

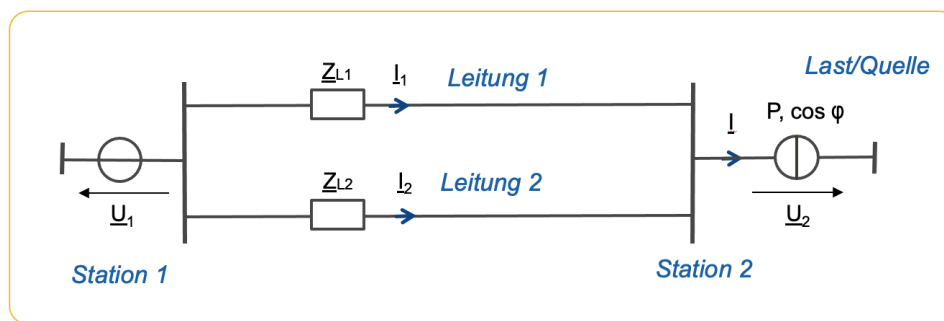
Bemerkung: Da die Leitungen in den Stationen auf jeweils den gleichen Sammelschienen und somit auf gleichen Potenzial liegen, sind die Leitungsimpedanzen Z_1 und Z_2 parallelgeschaltet. Die Ströme teilen sich somit im umgekehrten Verhältnis der Impedanzen auf: $I_1/I_2 = Z_2/Z_1$ (wobei ohne Unterstrich die Beträge bezeichnet sind).

Für das Blindleistungsverhältnis gilt somit: $Q_1/Q_2 = (X_1 I_1^2) / (X_2 I_2^2) = (X_1/X_2) * (Z_2/Z_1)^2$. Bei einem im Übertragungsnetz üblichen Verhältnis von $X/R \approx 10$ gilt somit annähernd: $Q_1/Q_2 \approx X_2/X_1$. Da $X_2/X_1 > 1$ überwiegt die Blindleistung Q_1 .

Frage 3.1.2: Elektrisches Ersatzschaltbild. Erstellen Sie ein elektrisches Ersatzschaltbild der Anordnung. Hinweis: Verwenden Sie als Last an Station 2 eine Stromquelle.

Lösung: siehe Abbildung.

Die Leitungen 1 und 2 bilden eine Masche. Das Netz ist an Station 1 durch eine Spannungsquelle abgebildet, die Last (bzw. Einspeisung) an Station 2 durch eine Stromquelle. Die Stromquelle an Station 2 repräsentiert die Summe aller Zuflüsse und Abflüsse an der Sammelschiene 2.



Frage 3.1.3: Leitungseigenschaften. Die Leitungen 1 und 2 sollen als Freileitung in der Spannungsebene 220 kV mit 2 Leiterseilen pro Phase ausgeführt sein. Die thermische Grenzleistung pro System beträgt 500 MVA. Für die Leiterseile gilt: $R' = 0,062 \, \Omega/\text{km}$, $X' = 0,32 \, \Omega/\text{km}$. Leitung 1 hat eine Länge von 65 Kilometern, Leitung 2 eine Länge von 100 km. Welchen Anteil der Last übernimmt Leitung 2?

Lösung: Die längere Leitung 2 übernimmt einen Anteil von $Länge_1/Länge_2 = 0,65 = 65\%$ der Nennlast.

Frage 3.1.4: Last. Als Last werden $P = 800 \text{ MW}$ mit einem Lastfaktor $\cos \phi = 0,95$ nacheilend angenommen. Berechnen Sie überschlägig die Auslastung beider Leitungen bezogen auf ihre thermische Grenzleistung. Hinweis: Verwenden Sie als Bezugspunkt die gleichmäßige Auslastung beider Leitungen.

Lösung: Bei gleichen Leitungslängen wäre jede Leitung mit $400 \text{ MW} / 500 \text{ MW} = 80\%$ ausgelastet. Wegen der unterschiedlichen Leitungslängen ist der Strom in Leitung 2 nur 65% des Stroms in Leitung 1, d.h. (1) $I_2 = 0,65 I_1$. Für den gesamten Strom gilt: (2) $I = I_1 + I_2$. Durch Einsetzen von (1) in (2) berechnet sich der Strom in Leitung 1 zu: $I = 1,65 I_1$ und somit $I_1 = 0,61 I$. Leitung 1 trägt somit statt $I_{1,\text{ausgeglichen}} = 0,5 I$ einen 122% höheren Stromanteil. Der Anteil von Leitung 2 beträgt folglich 78% des Stroms im ausgeglichenen Zustand.

Das System wird bei 800 MW/ 1000 MW mit 80% der thermischen Grenzleistung betrieben. Folglich befindet sich Leitung 1 im Bereich 100% seiner thermischen Grenzleistung, während Leitung 2 nur 65% ihrer thermischen Grenzleistung trägt.

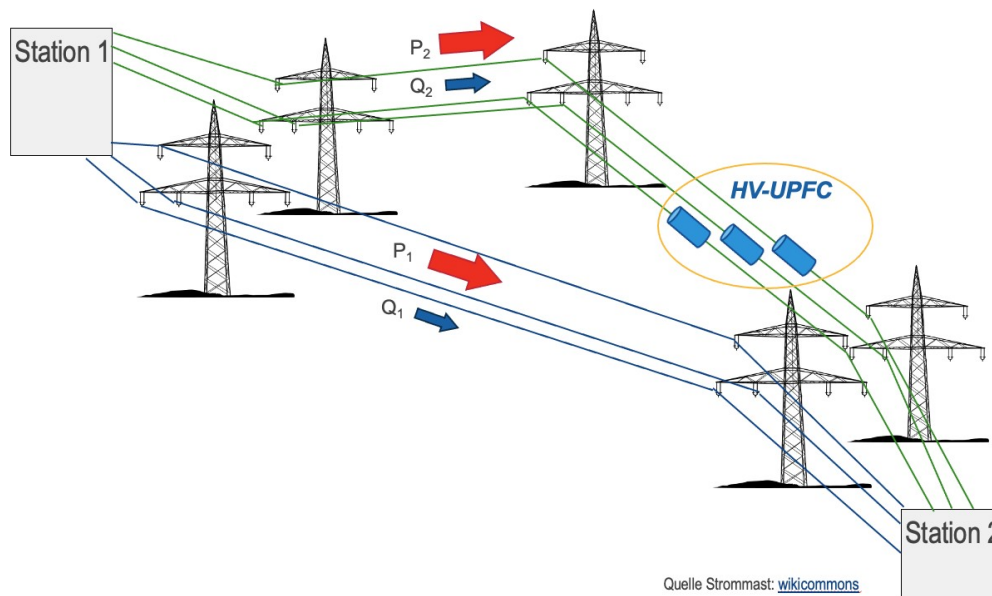
Bemerkung: In dieser überschlägigen Betrachtung wurde der Lastfaktor und der Blindleistungsanteil der Leitung vernachlässigt. Eine genauere Berechnung kann mit Hilfe eines Tabellenwerks erfolgen.

3.2. Einführung eines Lastflussreglers

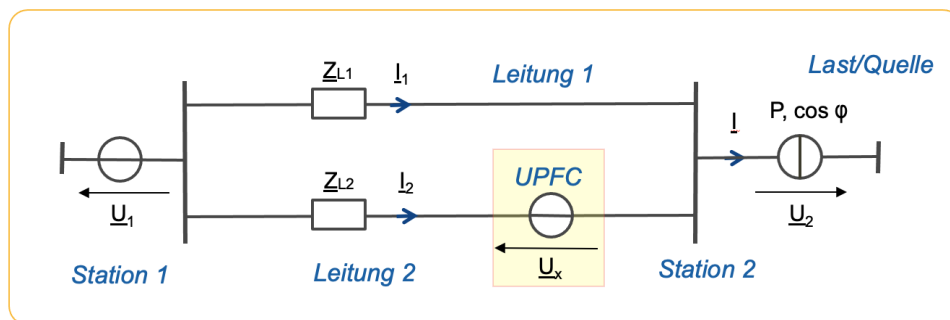
Die Auslastung beider Leitungen soll durch Einführung eines Lastflussreglers in einer der Leitungen verbessert werden, wie in folgender Abbildung dargestellt.

Solche Lastflussregler finden sich in der Literatur unter den Stichworten FACTS (Flexible AC Transmission), bzw. UPFC (Uniform Power Flow Controller). Phasenschiebertransformatoren stellen einen Spezialfall eines solchen UPFC dar. In der Abbildung ist der Lastflussregler mit „HV-UPFC“ bezeichnet. Das Kürzel HV für „High-Voltage“ soll hierbei die Spannungsebene anzudeuten. Lastflussregler sind auch im Verteilnetz einsetzbar, u.a. in vermaschten Abgängen in Ortsnetzen.

Der Lastflussregler wirkt als serielle Anlage in der Leitung, wie in der Abbildung dargestellt. Die zur Lastflussregelung benötigte Energie wird der Leitung entnommen. Grundsätzlich wäre eine Montage in der Leitung denkbar, wie in der Abbildung dargestellt. Größere Anlagen werden seriell in die Leitung eingekoppelt.



Frage 3.2.1: Funktionsprinzip. Der Lastflussregler prägt eine Spannung an seinen Anschlussklemmen in die angeschlossene Leitung ein, wie in folgender Abbildung dargestellt. Wie lässt sich hierdurch die Auslastung beider Leitungen beeinflussen? Erläutern Sie das Funktionsprinzip.



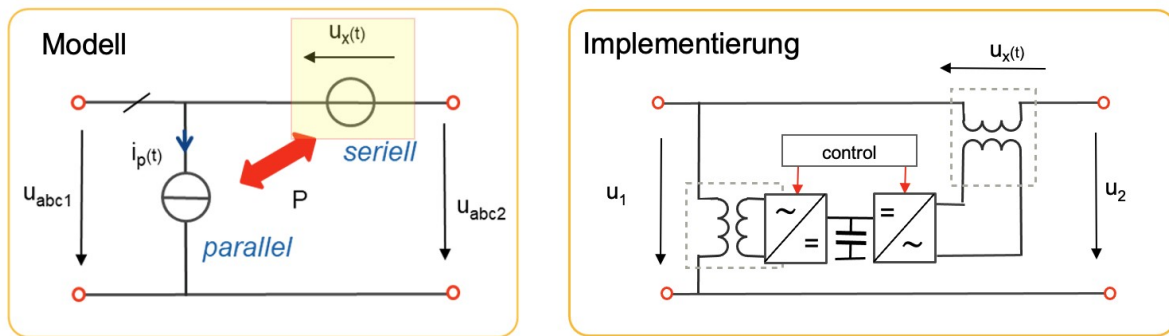
Lösung: Leitungen 1 und 2 bilden eine Masche. Die eingeprägte Spannung $\underline{U}_x$ bewirkt einen Kreisstrom in dieser Masche. Dieser Kreisstrom $\underline{I}_x$ überlagert sich mit dem eingeprägten Strom $\underline{I}$ der Last (bzw. der Einspeisung). Als Kreisstrom hat der Strom $\underline{I}_x$ in Leitung 1 die umgekehrte Richtung wie in Leitung 2. Setzt man nach dem Überlagerungsprinzip den eingeprägten Strom $\underline{I} = 0$, so ergibt sich aus der Maschengleichung:

$$\underline{Z}_{L1} \cdot \underline{I}_x + \underline{U}_x - \underline{Z}_{L2} \underline{I}_x = 0 \quad (3.2.1)$$

Wenn die eingeprägte Spannung so gewählt wird, dass der Kreisstrom $\underline{I}_x$ den Strom in der längeren Leitung 2 verstärkt, vermindert er den Strom in der kürzeren Leitung 1. Auf diese Weise sollte sein ein Ausgleich erzielen lassen.

Frage 3.2.2: Physikalische Realisierung. Das Einprägen einer seriellen Spannung ist mit der Abgabe bzw. der Aufnahme von Wirkleistung verbunden, sofern die eingeprägte Spannung nicht orthogonal zum Strom der Leitung gewählt wird. Diese Wirkleistung muss der Lastflussregler der Leitung entnehmen bzw. in die Leitung abgeben, damit der Energiesatz gewahrt bleibt (für den Lastflussregler gilt Ausgangsleistung = Eingangsleistung).

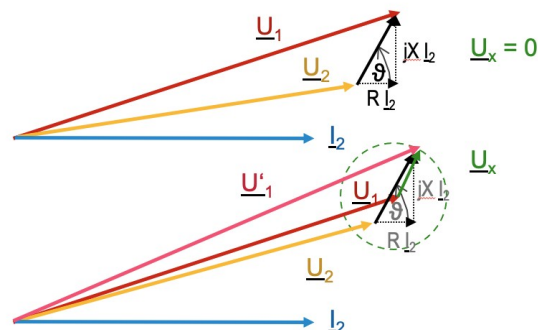
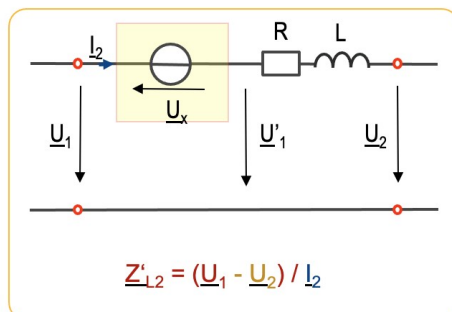
Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Lastflussreglers (in der Literatur zu finden unter dem Stichwort UPFC), bestehend aus einem Parallelsystem, das als Stromquelle geführt wird, und einem Seriensystem, das als Spannungsquelle geführt wird und die serielle Spannung $\underline{U}_x$ in die Leitung einprägt. Erläutern sie das Funktionsprinzip bzgl. der Leistungsbilanz.



Lösung: (1) Sofern die eingeprägte Spannung orthogonal zum Leitungsstrom gewählt wird, ist der Kreisstrom $\underline{I}_x$ ein Blindstrom. In diesem Fall wird durch das Seriensystem keine Wirkleistung abgeführt, bzw. keine Wirkleistung aufgenommen. Das Parallelsystem kann auf den Ausgleich der Verluste zum Betrieb des Lastflussreglers reduziert werden.

(2) Seriensystem und Parallelsystem sind in der Wirkleistung gekoppelt: Die vom Seriensystem benötigte Wirkleistung wird durch das Parallelsystem bereitgestellt (in beiden Lastflussrichtungen). Das Blockschaltbild im linken Teil der Abbildung stellt eine leistungselektronische Realisierung dar. Phasenschiebertransformatoren arbeiten nach dem gleichen Funktionsprinzip.

Frage 3.2.3: Zeigerdiagramm. Bezogen auf Leitung 2 ergibt sich das in folgender Abbildung dargestellte Ersatzschaltung und das daneben dargestellte Zeigerdiagramm. Wie erklärt sich der Einfluss des Lastflussreglers auf Leitung 2? Welche Wirkleistung und welche Blindleistung wird durch den Lastflussregler bereitgestellt? Hinweis: Erläutern Sie die Verhältnisse ohne eingeprägte Spannung ($\underline{U}_x = 0$) und mit eingepprägter Spannung.



Lösung: Das Lastflussregler verändert die Leitungsimpedanz $\underline{Z}'_{L2}$.

(1) Ohne Lastflussregler ($\underline{U}_x = 0$): Ergibt sich durch den Leitungswiderstand R und die Leitungsreaktanz $X = L$ ein Spannungsabfall $(\underline{U}_1 - \underline{U}_2) = (R + jX) \underline{I}_2$. Dieser Zusammenhang ist im Zeigerdiagramm rechts oben dargestellt.

(2) Mit Lastflussregler ($\underline{U}_x \neq 0$): Wählt man die Spannung $\underline{U}_x$ entgegen dem Spannungsabfall aus (1), so lässt sich dieser reduzieren. Es gilt:

$$(\underline{U}_1 - \underline{U}_2) = (R + jX) \underline{I}_2 - \underline{U}_x \quad (3.2.2)$$

Für $\underline{U}_x = (R + jX) \underline{I}_2$ ist $\underline{U}_2 = \underline{U}_1$. In diesem Sinne beeinflusst die eingeprägte Spannung $\underline{U}_x$ die Gesamtimpedanz der Leitung, gemessen als

$$\underline{Z}'_{L2} = (\underline{U}_1 - \underline{U}_2) / \underline{I}_2. \quad (3.2.3)$$

Bemerkung: Die Impedanz in Leitung 2 beträgt $Z_{L2} = R + jX$. Mit den Spannungen U_1 und U_2 an den Stationen 1 und 2 ergibt sich die Impedanz Z'_{L2} einschließlich der eingepprägten Spannung U_x gemäß Gleichung (3.2.3), wobei U_x die Spannungsdifferenz nach Gleichung (3.2.2) verändert.

Wirkleistung und Blindleistung: $P_x = U_x I_2 \cos(\varphi_{U_x} - \varphi_{I_2})$; $Q_x = U_x I_2 \sin(\varphi_{U_x} - \varphi_{I_2})$.

Frage 3.2.4: Einbauort des Lastflussreglers. Welcher Ort erscheint für den Einbau des Lastflussreglers geschickter: Leitung 1 oder Leitung 2? Begründen Sie Ihre Wahl.

Lösung: Beide Einbauorte funktionieren: In einer geschlossenen Masche ist der Einbauort beliebig. In Leitung 1 mit der geringeren Impedanz lässt sich die Last mit Hilfe des Lastflussreglers reduzieren (bzw. der Strom verdrängen). In Leitung 2 mit der höheren Impedanz kann der Lastflussregler die Last erhöhen bzw. zusätzliche Strom aufnehmen.

Grundsätzlich erscheint die Erhöhung der Aufnahmefähigkeit durch den Lastflussregler die bessere Wahl, da die Leistung in diesem Zweig zugunsten anderer Zweige erhöht wird. In einem weiter verzweigten Netz wäre bei Verdrängung des Stromes aus dem Zweig mit dem Maschenstromregler unklar, wo der zusätzliche Strom bzw. die zusätzliche Leistung aufgenommen wird.

3.3. Berechnung der Lastflüsse

Zur Übersicht und zur näheren Untersuchung der wurde ein [Tabellenwerk](https://www.srupp.de/ENT/HV_UPFC_Simulation.xlsx) erstellt, das für diese Aufgabe Verwendung finden soll (https://www.srupp.de/ENT/HV_UPFC_Simulation.xlsx). Eine Übersicht über die Bedienung des Tabellenwerks findet sich in Anhang A.

Frage 3.3.1: Leitungsimpedanzen. Als Leitungseigenschaften wurden die Werte aus Aufgabe 3.1, Frage 3.1.3 verwendet für eine Übertragung mit 220 kV. Berechnen Sie die Leitungsimpedanzen der Leitungen 1 und 2. Welches Verhältnis X/R liegt vor? Welche Veränderungen wären in einer 380 kV-Leitung zu erwarten?

Lösung: Siehe Arbeitsblätter „Dimensionierung 220 kV“ und „Dimensionierung 380 kV“. Beim 220 kV-System beträgt das Verhältnis $X/R \approx 5$. Bei einem 380 kV-System ist mit den Angaben der Tabelle aus dem Arbeitsblatt ein Verhältnis $X/R \approx 10$ zu erwarten. Das 380 kV ist mit guter Näherung rein reaktiv. Die Regelungsaufgabe im 220-kV-System ist somit anspruchsvoller.

Frage 3.3.2: Betrieb ohne Lastflussregler. Welche Lastverhältnisse stellen bei einer Last von insgesamt 800 MW (über beide Leitungen) ohne Regler ein? Vergleichen Sie mit Ihrer Abschätzung aus Aufgabe 3.1, Frage 3.1.4

Lösung: siehe folgende Abbildung.

UPFC	0	0 = off 1 = on 2 = reactive 3 = PST
Voltage	8000	Phase angle 79,95 4 = manual operation
Assumptions:		
Station:	1000	MVA
Load:	800	MW
No of lines	2	
Load per line	400	MW (3phase)
Total load	800	MW
cos(φ)	0,95	

Meshed lines	
Line 1 Z_{L1} I_1	Line 2 Z_{L2} I_2
Station 1 U_1	Station 2 U_2
UPFC U_x	
Load/source $P, \cos \varphi$	

U_1 (pu)	U_2 (pu)
100%	86,9%

	Re (Ω)	Im (Ω)	/Z/ (Ω)	ϕ_z (Grad)
Line 1 Z_{L1}	4,03	20,8	21,2	79,0
Line 2 Z'_{L2}	6,20	32,0	32,6	79,0

Line 1 102%	P (MW) 441,12	cos(φ) 0,86	Q (MVar) 256,69	S (MVA) 510,37
Line 2 66%	P (MW) 286,73	cos(φ) 0,86	Q (MVar) 166,85	S (MVA) 331,74
UPFC	P (MW) 0,00	cos(φ) #DIV/0!	Q (MVar) 0,00	S (MVA) 0,00
Voltage	0	Phase angle #DIV/0!		

Die kürzere Leitung 1 erreicht annähernd ihre thermische Grenzleistung, während Leitung 2 noch bei einer Auslastung von 66% noch Reserve bietet. Dieses Ergebnis stimmt gut mit der überschlägigen Betrachtung aus Aufgabe 3.1 überein.

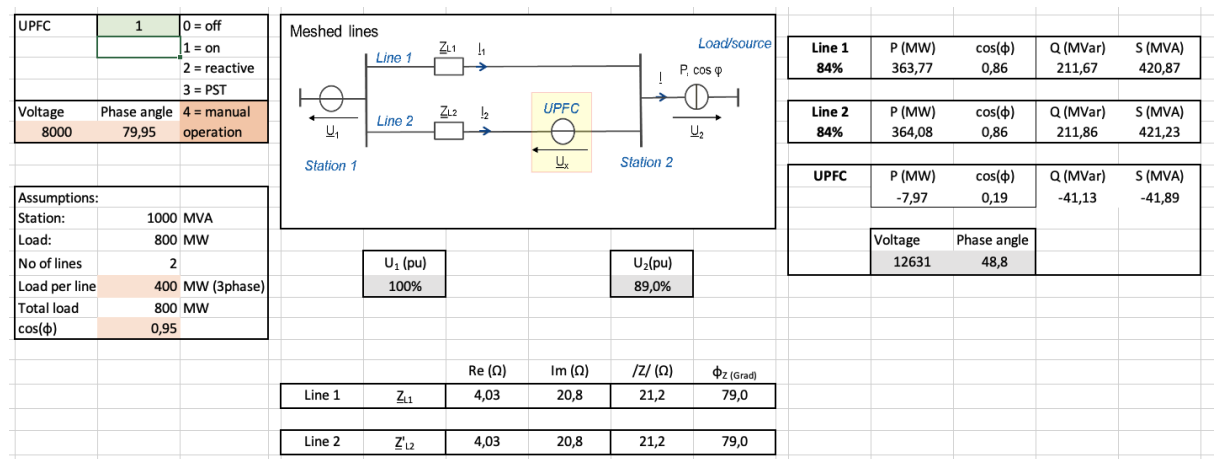
Grund für das Ungleichgewicht sind die Impedanzen, die im Tabellenwerk in der Mitte unten ebenfalls dargestellt sind: Im Verhältnis der Leitungslängen von ca. 3/2 ist die Impedanz der längeren Leitung 2 etwa 50% größer als die Impedanz der Leitung 1.

Der Winkel der Impedanz beträgt gemäß des Verhältnisses X/R etwa 80% (im Tabellenwerk 79%). Die Leitungen sind somit vorwiegend reaktiv. Dieser Spannungswinkel (bezogen aus den Strom I_2) sollte nach den Betrachtungen aus Frage 3.2 für die eingepreiste Spannung $\underline{U}_x$ günstig sein.

Frage 3.3.3: Betrieb mit Lastflussregler. Betreiben Sie das System mit eingeschalteten Lastflussregler (UPFC = 1). Interpretieren Sie die Ergebnisse und begründen Sie das Funktionsprinzip. Welche Leistung stellt der Lastflussregler bereit?

Hinweis: Der in der Anzeige des UPFC dargestellte Spannungswinkel ist der Spannungswinkel von $\underline{U}_x$ bezogen auf die Eingangsspannung $\underline{U}_1$, da $\underline{U}_1$ als Bezugssystem der Berechnungen dient. Der Winkel des Stroms I_2 bezogen auf die Spannung $\underline{U}_1$ findet sich im Arbeitsblatt „Computer“.

Lösung: siehe folgende Abbildung.



Die Leitungen sind nun gleich ausgelastet. Die Begründung liefert die Leitungsimpedanz Z'_{L2} , berechnet gemäß Gleichung (3.2.3): Beide Leitungsimpedanzen erscheinen nun gleich.

Der Spannungswinkel ϕ_{Ux} ist in der Übersicht mit $\phi_{Ux} = 48,8$ Grad bezogen auf die Spannung $\underline{U}_1$ angegeben. Den Stromwinkel ϕ_{I2} in Bezug auf die Spannung $\underline{U}_1$ findet man im Arbeitsblatt „Computer“ mit einem Wert von $\phi_{I2} = -30,2$ Grad. Somit ergibt sich für den Winkel

$$\phi_{Ux,I2} = (\phi_{Ux} - \phi_{I2}) \quad (3.3.1)$$

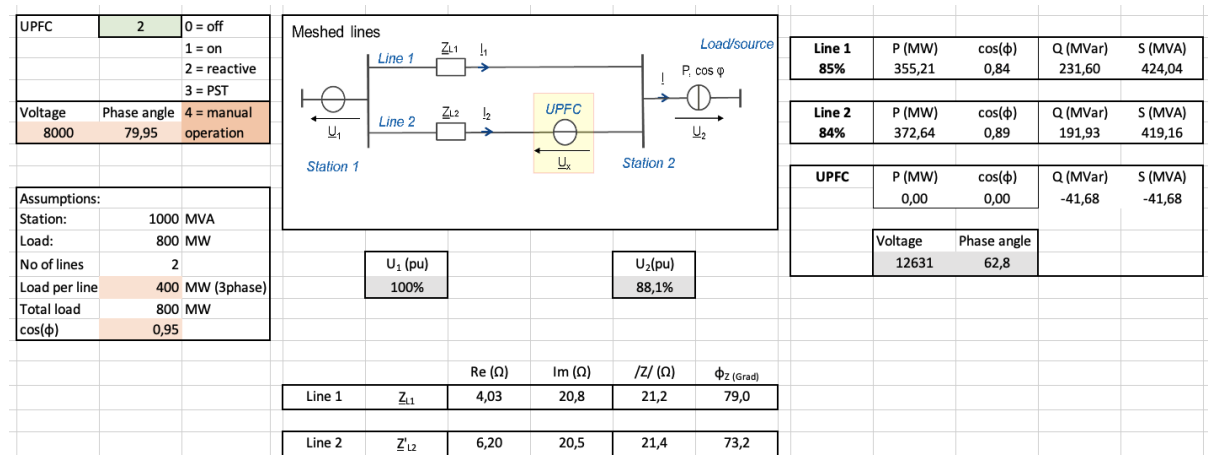
zwischen $\underline{U}_x$ und dem Strom I_2 ein Wert von $\phi_{Ux,I2} = 79$ Grad, entsprechend dem Winkel aus dem Verhältnis X/R .

Das Lastflussregler stellt somit seinen Spannungswinkel nach dem Impedanzverhältnis, und den Betrag der Spannung $\underline{U}_x$ in geeigneter Weise abhängig vom Betrag des Leitungsstroms I_2 . Nach dieser einfachen Regel arbeitet die Berechnung im Tabellenwerk.

Der Lastflussregler prägt eine Spannung von ca. 13 kV bereit (entsprechend ca. 6% bezogen auf 220 kV) und stellt eine Wirkleistung von ca. 8 MW bereit, sowie eine Blindleistung von ca. 41 MVar. Gemäß dem Verhältnis X/R arbeitet der Lastflussregler somit vorwiegend reaktiv.

Frage 3.3.4: Reaktiver Lastflussregler. Wenn man auf die Bereitstellung von Wirkleistung verzichtet, vereinfacht sich die Implementierung des Reglers erheblich: Man benötigt nur das Seriensystem (zusammen mit einer Versorgung für dessen Betrieb). Unter welchen Bedingungen eignen sich reaktive Lastflussregler? Untersuchen Sie den Betrieb im gegebenen System mit Hilfe des Tabellenwerks. Welche Unterschiede ergeben sich zu vollständigen Lastflussregler aus Frage 3.3.2?

Lösung: siehe folgende Abbildung.



Der Ausgleich gelingt auch hiermit sehr gut: Der Lastfluss ist annähernd ausgeglichen. Grund hierfür ist der mit einem Verhältnis $X/R \approx 5$ annähernd reaktive Impedanz der Leitung.

Ein Blick auf die Impedanzen zeigt, dass die Anpassung von Z'_{L2} an die Impedanz Z_{L1} nun nicht mehr gelingen kann: Während die Reaktanzen (= Imaginärteile) annähernd übereinstimmen, ist eine Anpassung des Realteils R'_2 nun nicht mehr möglich: Der Realteil der Leitung 2 bleibt unverändert. Da der Imaginärteil überwiegt, bleiben die Auswirkungen gering.

Vergleich mit vollständigem Regler: Der Lastflussregler stellt nun keine Wirkleistung bereit. Die abgegebene Blindleistung beträgt wiederum ca. 42 MVar. Der Betrag der eingprägten Spannung U_x bleibt annähernd gleich. Die Phase in Bezug auf den eingprägten Strom beträgt nun $\varphi_{U_x, I_2} = (\varphi_{U_x} - \varphi_{I_2}) = 62,8 \text{ Grad} + 27,2 \text{ Grad} = 90 \text{ Grad}$.

Frage 3.3.5: Phasenschiebertransformator. Phasenschiebertransformatoren sind so konstruiert, dass die eingprägte Spannung U_x orthogonal zur Bezugsspannung U_1 ist. Sie verschieben somit die Phase U_2 zu U_1 . Die Anlagen verfügen über ein Seriensystem zum Einprägen der Spannung U_x und über ein hiermit gekoppeltes Parallelsystem zum Ausgleich der Wirkleistung. Diese Betriebsart lässt sich im Tabellenwerk simulieren. Untersuchen Sie den Phasenschieberbetrieb und vergleichen Sie mit den vorausgesehenen Betriebsarten.

Hinweis: Zeigerdiagramme finden sich im Arbeitsblatt „Computer“, eine Übersicht über die Betriebsarten findet sich in Anhang A.

Lösung: siehe folgende Abbildung.

Auch hiermit wird die Auslastung der Leitungen gleichmäßiger, wobei sich durch Erhöhung des Spannungsbetrags der Effekt noch verbessern ließe. Der wesentliche Effekt kommt durch die Blindleistung zustande, die auf den reaktiven Teil der Leitungsimpedanz wirkt. Ein Blick auf die Impedanzen zeigt, dass die Anpassung des Imaginärteils gelingt, während sich der Realteil R'_{L2} erhöht. Grund hierfür ist der starre Spannungswinkel in Bezug auf die Spannung U_1 .

Die aufgenommene Wirkleistung ist mit $P_x \approx 15$ MW vergleichsweise hoch. Grund für die Leistungsaufnahme ist der recht große Winkel $\varphi_{U_x, I_2} = (\varphi_{U_x} - \varphi_{I_2}) = 90 \text{ Grad} + 21,8 \text{ Grad} = 111,8 \text{ Grad}$, wodurch sich der Lastfluss im Vergleich zum Betrieb als UPFC (mit $\varphi_{U_x, I_2} = 79 \text{ Grad}$) umkehrt.

UPFC	3	0 = off 1 = on 2 = reactive 3 = PST
Voltage	8000	Phase angle 79,95 4 = manual operation
Assumptions:		
Station:	1000 MVA	
Load:	800 MW	
No of lines	2	
Load per line	400 MW (3phase)	
Total load	800 MW	
cos(ϕ)	0,95	

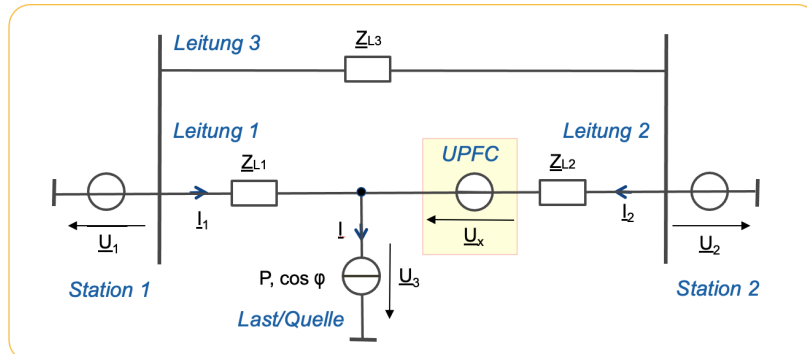
Line	P (MW)	cos(ϕ)	Q (MVar)	S (MVA)
Line 1	89%	353,26	0,79	273,71
Line 2	81%	374,59	0,93	149,82
UPFC	14,90	-0,37	-37,25	-40,12

Voltage	Phase angle
12631	90,00

	Re (Ω)	Im (Ω)	/Z/ (Ω)	ϕ_Z (Grad)
Line 1	Z_{L1}	4,03	20,8	79,0
Line 2	Z_{L2}	10,63	20,9	63,1

Bemerkung: In einem 380 kV-System mit $X/R \approx 10$ funktioniert diese Betriebsart besser. Die Implementierung als Phasenschiebertransformator ist darüber hinaus robust und in der Praxis erprobt. Eine leistungselektronische Implementierung als UPFC bietet mehr Flexibilität bzgl. der Regelung von Betrag und Phase, bzw. die Möglichkeit der Realisierung eines rein reaktiven Systems.

Frage 3.3.5: Vermaschte Stationen. Folgende Abbildung zeigt die beiden Stationen, wobei in einer der Leitungen ein zusätzlicher Abzweig eingebaut wurde, von dem Leistung bezogen wird (bzw. in den Leistung eingespeist wird), und Station 2 nun ebenfalls vom Netz $\underline{U}_2$ gespeist wird.



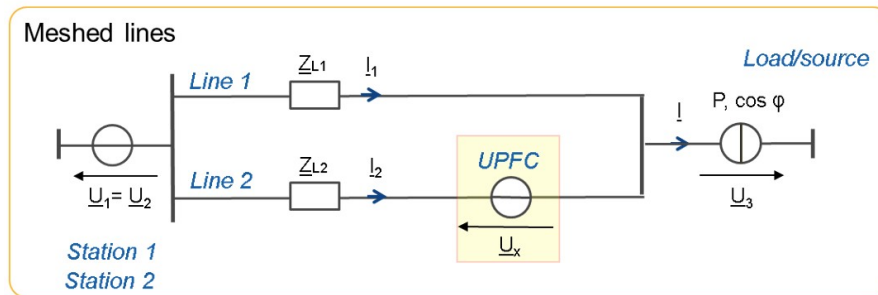
Kann ein Lastflussregler hierbei eine Verbesserung bringen? Begründen Sie Ihre Aussage. Hinweis: Zerlegen Sie die Anordnung mit Hilfe des Überlagerungsprinzips in die Fälle:

- (1) $\underline{U}_2 = \underline{U}_1$ mit Laststrom $\underline{I}$,
- (2) $\underline{U}_2 \neq \underline{U}_1$ ohne Laststrom ($\underline{I} = 0$): Ansatz $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}$.

Skizzieren Sie beide Ersatzschaltbilder und erläutern Sie den Effekt des Lastflussreglers.

Lösung: Fall (1) $\underline{U}_2 = \underline{U}_1$, mit Laststrom $\underline{I}$: siehe folgende Abbildung.

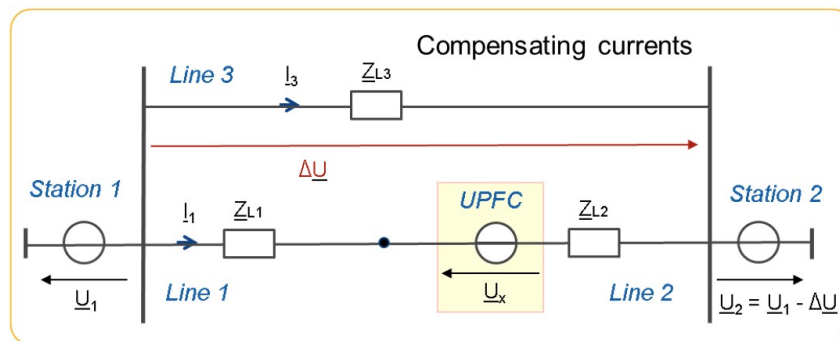
Station 1 und Station 2 liegen auf gleichem Potenzial, der Zweig mit Leitung 3 spielt somit keine Rolle.



Dieser Fall kann unmittelbar auf den bisher diskutierten Fall zweier paralleler Leitungszweige auf dem Weg zur Last (bzw. Einspeisung) zurückgeführt werden, wobei beide Zweige bei unterschiedlicher Länge unterschiedliche Impedanzen haben. In diesem Fall kann ein Lastflussregler für einen Ausgleich zwischen beiden Zweigen sorgen.

Die Gleichheit der Spannungen $U_2 = U_1$ an den Stationen 1 und 2 kann durch eine Spannungsregelung herbeigeführt werden, wie sie z.B. durch Regeltransformatoren erfolgt.

Fall (2) $U_1 = U_2 + \Delta U$ ohne Last (Laststrom $I = 0$): siehe folgende Abbildung.



Sollten die Spannungen an den Stationen 1 und 2 voneinander abweichen, so ergeben sich auch ohne Laststrom Ausgleichsströme zwischen beiden Stationen. Die Ströme verhalten sich hierbei umgekehrt proportional zu den Impedanzen der beiden Zweige (Leitung 3, Leitung 1+2):

$$I_i = (U_1 - U_2) / Z_{Li} \quad (3.3.2)$$

Die durch den Lastflussregler eingeprägte Spannung U_x verursacht zusätzliche Kreisströme, die sich den Ausgleichsströmen überlagern. Der Betrieb des Lastflussreglers auf Basis lokaler Messwerte erscheint nicht empfehlenswert. Auch bei vorhandenen entfernten Messwerten fällt die Formulierung eines passenden Regelungskonzepts schwer. Fall (2) sollte daher durch Regelung der Spannung an den Stationen 1 und 2 auf gleiche Werte vermieden werden.

3.4. Vertiefung als Seminararbeit

Ein Lastflussregler lässt sich mit Hilfe einer Simulation mit PowerFactory als Seminararbeit vertiefen. Hierbei kann ein Netzausschnitt im Übertragungsnetz (bzw. Verteilnetz) gewählt werden, in dem der Lastfluss durch den Regler beeinflusst werden soll. Das Funktionsprinzip und der erwartete Nutzen soll hierbei vorab analytisch beschrieben und begründet werden.

Der Lastflussregler lässt sich im einfachsten Fall als Spannungsquelle darstellen, die eine Spannung in den ausgesuchten Leitungszweig einprägt. Im Modell des Lastflussreglers ist die seriell eingeprägte Spannung der wesentliche Effekt. Das Seriensystem des Regler kann Blindleistung bereitstellen. Vom Seriensystem bereitgestellte Wirkleistung muss über das Parallelsystem der Leitung entnommen werden. Bei Verzicht auf das Parallelsystem lässt sich am Modell der Spannungsquelle

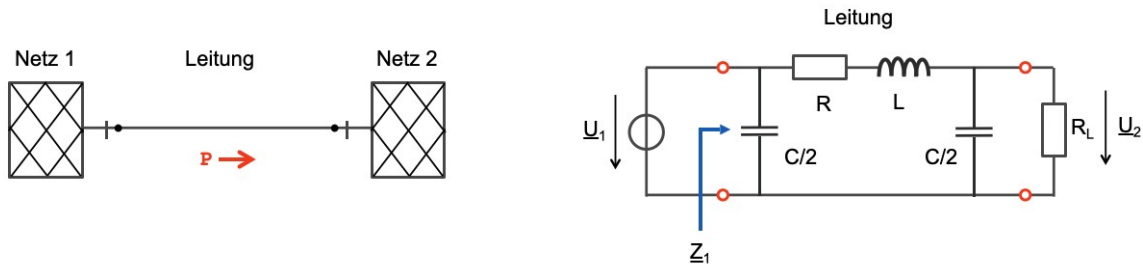
für das Seriensystem die benötigte Wirkleistung ermitteln, ohne dass dieser Anteil der Leitung wirklich entnommen wird.

In erster Näherung ist ein solches Modell hinreichend genau. Eine Ergänzung des Seriensystems ist möglich, rechtfertigt jedoch den Aufwand im Rahmen der Seminararbeit kaum. Alternativ zur Ergänzung des Seriensystems lassen sich fertige Bausteine für UPFC oder Phasenschiebertransformatoren zum Vergleich mit dem vereinfachten Modell als Spannungsquelle verwenden.

4. Leitungen und Kompensation

4.1. PI-Ersatzschaltung

Zur Nachbildung einer Leitung soll das PI-Ersatzschaltbild verwendet werden, wie in folgender Abbildung dargestellt.



Hierzu werden aus dem Widerstandsbelag R' , dem Induktivitätsbelag L' und dem Kapazitätsbelag C' mit Hilfe der Länge d der Leitung die Komponenten $\{R, L, C\}$ der Ersatzschaltung berechnet. Als Leitung kommen sowohl Freileitungen als auch Kabel in Frage.

Frage 4.1.1: Freileitung. Für eine 380 kV Freileitung mit Beseilung 4x 564/72 mm² Al/St finden sich im Datenblatt folgende Kenngrößen: $R' = 13,8 \text{ m}\Omega/\text{km}$, $L' = 0,8 \text{ mH}/\text{km}$, $C' = 14,2 \text{ nF}/\text{km}$. Die thermische Grenzleistung für ein Drehstromsystem ist mit 3000 MVA angegeben. Berechnen Sie (1) den Strangstrom, (2) den Wellenwiderstand, (3) die natürliche Leistung der Leitung, sowie (4) die Leitungsparameter $\{R, L, C\}$ für eine Länge von $d = 100 \text{ km}$. (5) In welchem Betriebszustand befindet sich die Freileitung bei Betrieb mit ihrer thermischen Grenzleistung?

Lösung: (1) Strangstrom: $S_n = \sqrt{3} U_n I_n$. Hieraus folgt $I_n = 4560 \text{ A}$ (verteilt auf 4 Leiterseile pro Phase).

(2) Wellenwiderstand: $R_w = \sqrt{L' / C'} = 237 \Omega$

(3) natürliche Leistung: Aus $P_{\text{nat}} = U_n^2 / R_w$ errechnet sich $P_{\text{nat}} = 608 \text{ MW}$.

(4) Leitungsparameter für $d = 100 \text{ km}$: $\{R = 1,38 \Omega, L = 80 \text{ mH}, C = 1,43 \mu\text{F}\}$

(5) Betrieb mit thermischer Grenzleistung: übernatürlich mit Faktor $S_n/P_{\text{nat}} = 4,9$.

Frage 4.1.2: Kabel. Für eine 380 kV Kabelsystem mit Querschnitt 2500 mm² Cu finden sich im Datenblatt folgende Kenngrößen: $R' = 10,8 \text{ m}\Omega/\text{km}$, $L' = 0,6 \text{ mH}/\text{km}$, $C' = 245 \text{ nF}/\text{km}$. Die thermische Grenzleistung für ein Drehstromsystem ist mit 1250 MVA angegeben. Berechnen Sie (1) den Strangstrom, (2) den Wellenwiderstand, (3) die natürliche Leistung der Leitung, sowie (4) die Leitungsparameter $\{R, L, C\}$ für eine Länge von $d = 100 \text{ km}$. (5) In welchem Betriebszustand befindet sich das Kabelsystem bei Betrieb mit seiner thermischen Grenzleistung?

Lösung: (1) Strangstrom: $S_n = \sqrt{3} U_n I_n$. Hieraus folgt $I_n = 1900 \text{ A}$.

(2) Wellenwiderstand: $R_w = \sqrt{L' / C'} = 49 \Omega$

(3) natürliche Leistung: Aus $P_{\text{nat}} = U_n^2 / R_w$ errechnet sich $P_{\text{nat}} = 2918 \text{ MW}$.

(4) Leitungsparameter für $d = 100 \text{ km}$: $\{R = 1,08 \Omega, L = 60 \text{ mH}, C = 24,5 \mu\text{F}\}$

(5) Betrieb mit thermischer Grenzleistung: unternatürlich mit Faktor $S_n/P_{\text{nat}} = 0,4$.

Frage 4.1.3: Ersatzimpedanz Z_1 aus der Schaltung. Berechnen Sie aus der Ersatzschaltung die Ersatzimpedanz Z_1 am Anschaltort von Netz 1, abhängig vom Abschlusswiderstand R_L . Hinweis: Lösen sie diese Aufgabe numerisch. Vorgehensweise siehe z.B. Teil 1 des Skripts (T3M20601.1) in Abschnitt 2.2. Verwenden Sie hierzu eine Tabellenkalkulation für die Berechnung mit komplexen Zahlen (ein Muster finden Sie in Anhang B). Verwenden Sie die Werte aus

den Fragen 4.1.1 und 4.1.2. Welche Eingangsimpedanzen ergeben sich im Betrieb mit einer Nennleistung von 1800 MVA, bei thermischer Grenzleistung und bei Betrieb mit natürlicher Leistung? Welche maximale Leistung lässt sich jeweils realisieren? Vergleichen Sie die Freileitungstrecke mit der Kabelstrecke.

Lösung:	Freileitung	Kabel
Nennleistung: 1800 MVA ($R_L = 80 \Omega$)	$Z_1 = 82 \Omega$, $\cos\varphi = 0,96$ Strangstrom: 2,74 kA	$Z_1 = 67 \Omega$, $\cos\varphi = 0,95 (-1)$ Strangstrom: 2,74 kA
Thermische Grenzleistung:	3000 MVA bei $R_L = 48 \Omega$ $Z_1 = 50 \Omega$, $\cos\varphi = 0,9$ Strangstrom: 4,5 kA	1250 MVA bei $R_L = 115 \Omega$ $Z_1 = 73 \Omega$, $\cos\varphi = 0,84 (-1)$ Strangstrom: 1,9 kA
natürliche Leistung ($R_L = R_w$):	609 MVA bei $R_L = 237 \Omega$ $Z_1 = 238 \Omega$, $\cos\varphi = 1$ Strangstrom: 0,93 kA	4430 MVA bei $R_L = 49,5 \Omega$ $Z_1 = 50,8 \Omega$, $\cos\varphi = 1$ Strangstrom: 4,4 kA

Das Kabel kann weder mit der genannten Nennleistung, noch mit natürlicher Leistung betrieben werden, da beide weit außerhalb der thermischen Grenzen liegen. Im Bereich der thermischen Grenzleistung transportiert die Kabelstrecke nur ca. 40% der Leistung der Freileitung und ist hierbei stark kapazitiv (siehe $\cos\varphi = 0,84$ mit negativem Vorzeichen des Winkels).

Bei Betrieb mit thermischer Grenzleistung kumuliert auch die Freileitung Blindleistung: $\cos\varphi = 0,9$ mit positivem Vorzeichen des Winkels (d.h. der Strom eilt der Spannung nach). Diese Blindleistung muss am Anschlusspunkt von Z_1 vom Netz bzw. aus einer Kompensationsanlage bereitgestellt werden.

Frage 4.1.4: Vergleich von Freileitung und Kabel. Wodurch kommen die Unterschiede in den Eingangsimpedanzen für Freileitung und Kabel bei Betrieb mit thermischer Grenzleistung zustande (siehe Frage 4.1.3)? Warum kommen bei Freileitung und Kabelstrecke der Betrieb im Bereich der natürlichen Leistung nicht in Frage?

Lösung: Grund ist die Fehlanpassung in beiden Fällen ($R_L \neq R_w$): Bei der Freileitung in Richtung Kurzschluss (übernatürlicher Betrieb), bei der Kabelstrecke in Richtung Leerlauf (unternatürlicher Betrieb).

Freileitung:

- (1) Bei Betrieb mit thermischer Grenzleistung ist die Leitung überfordert (die Leistung liegt um einen Faktor 4,9 über der natürlichen Leistung): Die Leitung wird induktiv mit $\cos(\varphi) = 0,9$.
- (2) Bei Betrieb mit natürlicher Leistung beträgt die übertragene Leistung (mit dem Faktor 1/4,9) nur ca. 20% der thermischen Grenzleistung und ist somit für einen wirtschaftlichen Betrieb zu gering.

Kabelstrecke:

- (1) Bei Betrieb mit thermischer Grenzleistung ist die Kabelstrecke unterfordert (die Leistung liegt um einen Faktor 0,4 unter der natürlichen Leistung): Die Leitung wird kapazitiv mit einem $\cos(\varphi) = 0,84$ mit negativem Vorzeichen des Winkels.
- (2) Der Betrieb mit natürlicher Leistung wäre mit einer übertragenen Leistung von mehr als doppelter thermischer Grenzleistung verbunden (Faktor 1/0,4) und scheidet somit aus.

Frage 4.1.5: Blindleistungsbedarf von Freileitung und Kabel. Wie berechnet sich der Blindleistungsbedarf aus der Impedanz Z_1 und dem Betrag des Stroms? Welcher Blindleistungsbedarf ergibt sich für Freileitung und Kabel im Betrieb mit thermischen Grenzleistung? Wie lässt sich der

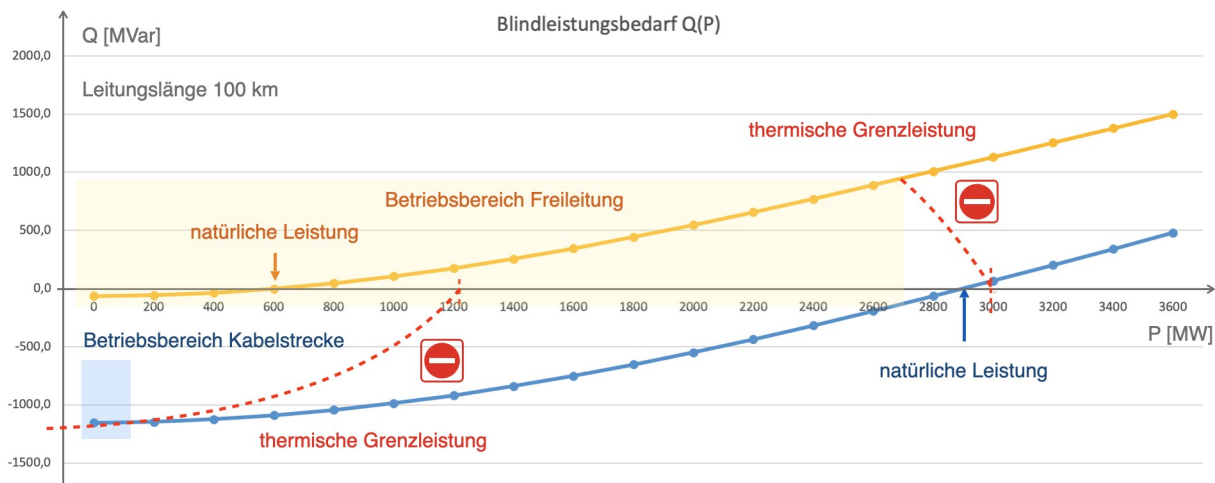
Blindleistungsbedarf in Abhängigkeit von der Wirkleistung in einem Diagramm darstellen? Hinweis: Es genügt eine Skizze. Einzelne Punkte lassen sich mit Hilfe der Tabellenkalkulation berechnen.

Lösung: (1) Am Eingang der Leitung gilt: $\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1$, wobei die Eingangsimpedanz der Leitung mit Last darstellt. Die Scheinleistung ist definiert als $\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \underline{I}_1^*$.

- Einsetzen der ersten Gleichung ergibt: $\underline{S}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \underline{I}_1^* = \underline{Z}_1 |\underline{I}_1|^2 = \underline{Z}_1 I_1^2 = \text{Re}\{\underline{Z}_1\} I_1^2 + j \text{Im}\{\underline{Z}_1\} I_1^2 = P_1 + jQ_1$. Die Blindleistung berechnet sich somit aus dem Betragsquadrat des Stroms multipliziert mit dem Imaginärteil der Eingangsimpedanz. Bemerkung: Dieser Wert ist für ein dreiphasiges System mit dem Faktor 3 zu multiplizieren.
- Alternativ erfolgt die Berechnung aus $\underline{S} = \sqrt{3} \underline{U} \underline{I}_1^* = \sqrt{3} U I_1 \cos(\varphi) + j \sqrt{3} U I_1 \sin(\varphi) = P + jQ$. Hierbei ist der Winkel φ der Phasenwinkel der Impedanz $\underline{Z}_1$.

(2) Betrieb mit thermischer Grenzleistung: Freileitung: $Q = 1140$ MVar für Abschluss mit $R_L = 48 \Omega$ (für 3000 MVA ohne Leitung); Kabelstrecke: $Q = -900$ MVar mit $R_L = 115 \Omega$ (für 1250 MVA).

(2) Diagramm: Mit Hilfe des Tabellenwerks erstellt, siehe folgende Abbildung.



Bemerkung: Die Kabelstrecke ist komplett unbrauchbar. Der Blindleistungsbedarf übersteigt bereits im Leerlauf in der Größenordnung thermischen Leistung. Somit erreichen die Blindströme im Leerlauf bereits den Betrag des thermischen Grenzwertes für den Strom. Mit wachsender Wirkleistung übersteigen die Ströme sofort die thermischen Grenzen.

Die Freileitung wird überwiegend oberhalb ihrer natürlichen Leistung betrieben und kumuliert mit steigender Last Blindleistung. Im Leerlauf ist die Freileitung leicht kapazitiv.

Frage 4.1.6: Grenzen der PI-Ersatzschaltung. Berechnen Sie die Übertragungsfunktion aus dem Verhältnis der Ausgangsspannung $\underline{U}_2$ zur Eingangsspannung $\underline{U}_1$ für die PI-Ersatzschaltung. Der Phasenwinkel der Übertragungsfunktion repräsentiert die Laufzeit als Phasenverschiebung: Welcher Phasenwinkel in Bezug auf eine Periode ist darstellbar? Wie groß ist folglich die darstellbare Laufzeit bezogen auf die Periodendauer, bzw. die Leistungslänge bezogen auf die Wellenlänge? Mit welchen Einschränkungen ist die PI-Ersatzschaltung nutzbar? Hinweis: Nehmen Sie eine verlustlose Leitung an, d.h. $R = 0$.

Lösung: Aus dem Spannungsteiler ergibt sich

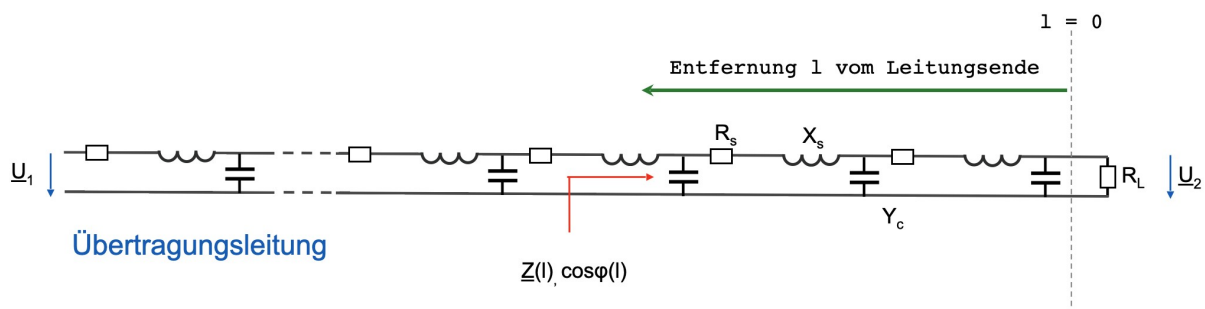
$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2 LC}{2} + j\omega \frac{L}{R_L}} \quad (4.1.1)$$

Bei Resonanz wird der Realteil im Nenner zu Null, die Phasenverschiebung beträgt -90 Grad. Oberhalb der Resonanzfrequenz wächst die Phasenverschiebung auf maximal -180 Grad. Mit den in der Aufgabe gegebenen Kenngrößen $\{L, C\}$ liegt die Resonanzfrequenz im Bereich einiger Kilohertz. Die maximale Phasenverschiebung beträgt somit 90 Grad, entsprechend einer Viertelperiode bzw. einer Viertelwellenlänge. Die maximal abbildbare Leitungslänge der PI-Ersatzschaltung reicht somit bis zu einer Viertelwellenlänge. In der Praxis sollte man deutlich unter einer Viertelwellenlänge bleiben, da die Leitung unterhalb der Resonanz betrieben wird.

Bemerkung: Die Wellenlänge ist abhängig von der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Signale auf der Leitung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt sich wiederum aus den Leitungskenngrößen und ist für Freileitungen und Kabel unterschiedlich. Es gilt $v_c = 1 / \sqrt{L' C'}$. Zusammen mit der Betriebsfrequenz f (hier: $f = 50$ Hz) bzw. der Periodendauer $T = 1/f$ berechnet sich die Wellenlänge aus $\lambda = v_c T = v_c / f$.

4.2. Erweiterte Ersatzschaltung

Für Leitungslängen mit Laufzeiten von mehr als einer Viertelperiode (d.h. mehr als 5 ms für eine Periodendauer von 20 ms) genügt die PI-Ersatzschaltung nicht mehr. Ein wesentlich besseres Modell erhält man durch die Verkettung von Leitungselementen kürzerer Längen, wie in folgender Abbildung dargestellt.



Die Kenngrößen der Leitungselemente berechnen sich aus den Impedanzbelägen der Leitung (Widerstand, Induktivität und Kapazität pro km) und der definierten Länge der Elemente. Ausgehend vom Leitungsende lässt sich die Impedanz auf die gleiche Weise wie bei der PI-Ersatzschaltung ermitteln, wobei in der Tabellenkalkulation wegen der konstanten Kenngrößen der Leitungselemente rekursiv vorgegangen werden kann.

Frage 4.2.1: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle auf der Leitung ermittelt sich aus den Leitungskenngrößen. Es gilt $v_c = 1 / \sqrt{L' C'}$. Zusammen mit der Betriebsfrequenz f bzw. der Periodendauer $T = 1/f$ berechnet sich die Wellenlänge aus $\lambda = v_c T = v_c / f$. Berechnen Sie die Viertelwellenlängen der Freileitung und der Kabelstrecke aus Aufgabe 4.1 für eine Betriebsfrequenz von $f = 50$ Hz.

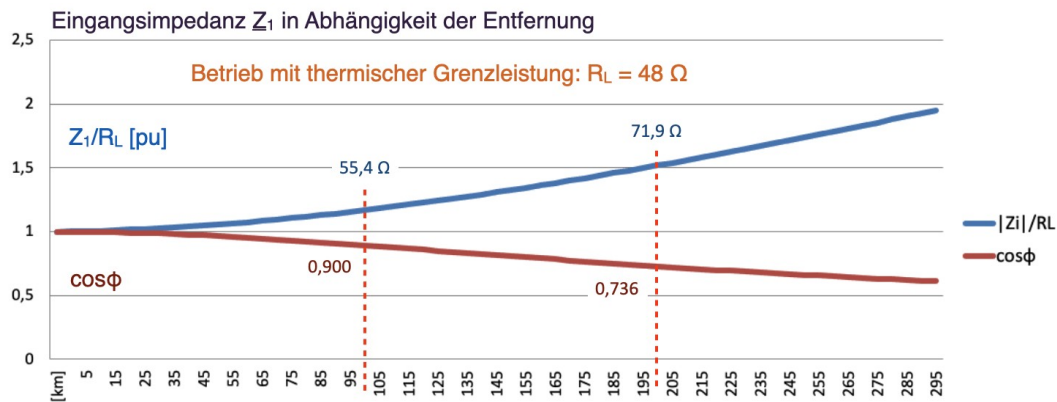
Lösung: (1) Für die Freileitung bleibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit den in Aufgabe 4.1 gegebenen Kenngrößen mit $v_c = 297 \cdot 10^6$ m/s annähernd bei der Lichtgeschwindigkeit. Mit einer Periodendauer von $T = 20$ ms beträgt die Wellenlänge hier $\lambda = v_c T = 5934$ km. Eine Viertelwellenlänge misst somit ca. 1500 km.

(2) Für die Kabelstrecke fällt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit den in Aufgabe 4.1 genannten Kenngrößen wegen des großen Kapazitätsbelags und des geringeren Induktivitätsbelags deutlich geringer aus: $v_c = 82,5 \cdot 10^6$ m/s. Mit einer Periodendauer von $T = 20$ ms beträgt die Wellenlänge hier $\lambda = v_c T = 1650$ km. Eine Viertelwellenlänge misst somit ca. 400 km.

Frage 4.2.2: Berechnungen mit Kettenmodell. Erstellen Sie ein Tabellenwerk zur Berechnung der Leistungsimpedanz in Abhängigkeit von der Entfernung, bzw. verwenden Sie für Ihre Untersuchungen das mit diesem Skript verfügbare Muster (siehe [Tabellenwerk](#)). Berechnen Sie die Ein-

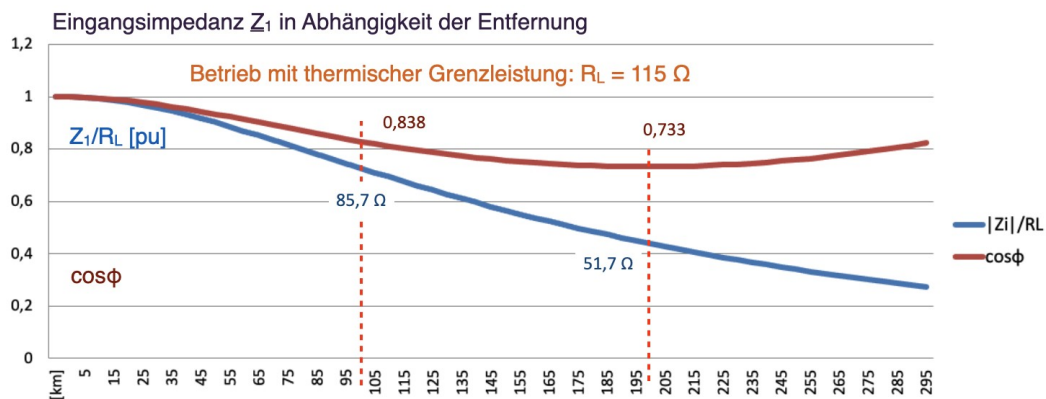
gangsimpedanzen der Freileitung und der Kabelstrecke für Entfernungen bis zu 300 km. Hinweis: Verwenden Sie die jeweilige thermische Grenzleistung.

Lösung: (1) Freileitung: siehe folgende Abbildung.



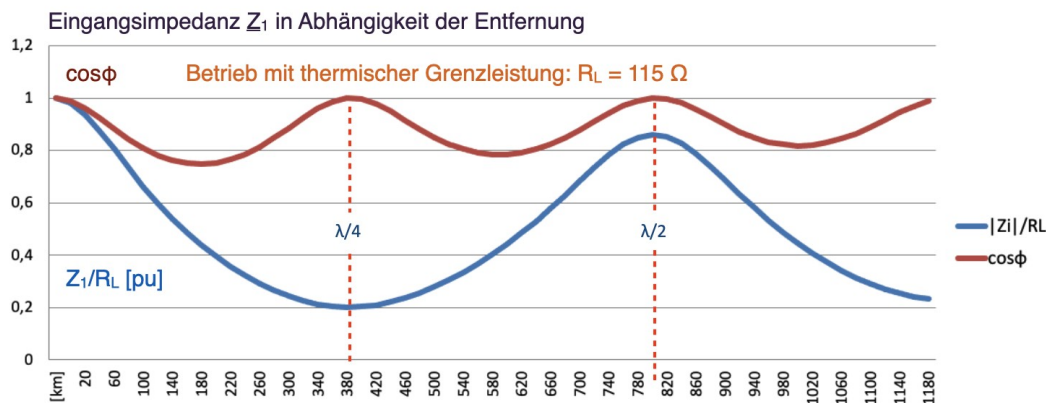
In Abhängigkeit der Entfernung ergeben sich folgende Werte 100 km: {55,4 Ω , cos = 0,9}, 200 km: {71,9 Ω , cos = 0,736}, 300 km: {93,7 Ω , cos = 0,611}.

(2) Kabelstrecke: siehe folgende Abbildung.



In Abhängigkeit der Entfernung ergeben sich folgende Werte 100 km: {85,7 Ω , cos = 0,838}, 200 km: {51,7 Ω , cos = 0,733}, 300 km: {31,5 Ω , cos = 0,822}.

Für die Kabelstrecke stellt die thermische Grenzleistung der bestmögliche Betriebsfall dar. Die Strecke lässt sich mit Entfernungen oberhalb von 40 km nicht vernünftig betreiben. Darüber hinaus zeigt das erweiterte Modell auch die Welleneffekte bei Überschreitung der Viertelwellenlänge:



In dieser Darstellung wurde mit 60 Längenelementen von jeweils 20 km bis zu einer Entfernung von 1200 km gerechnet. Die Ortsauflösung ist also vergleichsweise grob. Bei einer Viertelwellenlänge erreicht die Impedanz ihr Minimum, um dann wieder bis zur halben Wellenlänge zu steigen. Zur Leistungsübertragung über größere Entfernungen ist ein solch fehlangepasstes Medium nicht geeignet.

Bei der Freileitung wird bei 1200 km die Viertelwellenlänge nicht erreicht; es zeigt sich keine Periodizität. Jedoch würde die Reaktanz bei diesen Entfernungen für eine Leistungsübertragung mit thermischer Grenzleistung viel zu groß.

Frage 4.2.3: Grenzen der PI-Ersatzschaltung. Vergleichen Sie die mit der PI-Ersatzschaltung und dem verketteten Modell berechneten Eingangsimpedanzen. Bis zu welcher Leitungslänge lässt sich die PI-Ersatzschaltung nutzen? Hinweis: Verwenden Sie die jeweilige thermische Grenzleistung.

Lösung: (1) Freileitung: In Abhängigkeit der Entfernung ergeben sich folgende Werte 100 km: {55,5 Ω , $\cos = 0,9$ }, 200 km: {72,3 Ω , $\cos = 0,734$ }, 300 km: {95,0 Ω , $\cos = 0,606$ }. Im Vergleich mit der verketteten Schaltung sind bis zu einer Länge von 300 km keine Einschränkungen zu erkennen.

(2) Kabelstrecke: In Abhängigkeit der Entfernung ergeben sich folgende Werte 100 km: {86,7 Ω , $\cos = 0,842$ }, 200 km: {55,2 Ω , $\cos = 0,763$ }, 300 km: {40,3 Ω , $\cos = 0,899$ }. Wegen der vergleichbar kurzen Wellenlänge wird hier die Nähe der Viertelwellenlänge erreicht. Die Werte des PI-Ersatzschaltbildes genügen auch hier. Sie zeigen, dass der Betrieb bereits mit einer Länge von weniger als 100 km wegen des hohen Blindleistungsbedarfs die thermischen Grenzen reißt und somit nicht möglich ist.

Frage 4.2.4: Wie lässt sich der Blindleistungsbedarf in Abhängigkeit von der Eingangsimpedanz berechnen? Welcher Betriebsbereich ergibt sich anhängig von der Leitungslänge?

Lösung: (1a) Strangstrom berechnen: Am Eingang der Leitung gilt: $U_1 = Z_1 I_1$, woraus man den Betrag des Strangstroms $I_1 = U_1/Z_1$ errechnet. U_1 ist der Betrag der Strangspannung, d.h. $U_1 = U/\sqrt{3}$.

(1b) Die Blindleistung errechnet sich aus: $Q_1 = \text{Im}\{Z_1\} I_1^2$. Für ein dreiphasiges System berechnet man den dreifachen Wert $Q = 3 Q_1$. Alternativ verwendet man $Q = \sqrt{3} U I_1 \sin(\varphi)$.

(2a) Für die Freileitung ergibt sich folgende Bilanz:

Länge	I_{strang} [kA]	Q [MVar]	P [MW]	S [MVA]
100 km	3,96	1135	2344	2605
200 km	3,05	1360	1477	2007
300 km	2,34	1220	942	1541

Mit zunehmender Entfernung nimmt die Aufnahmefähigkeit der Freileitung für Leistung wegen der steigenden Impedanz ab. Oberhalb von 200 km überwiegt der Blindleistungsanteil.

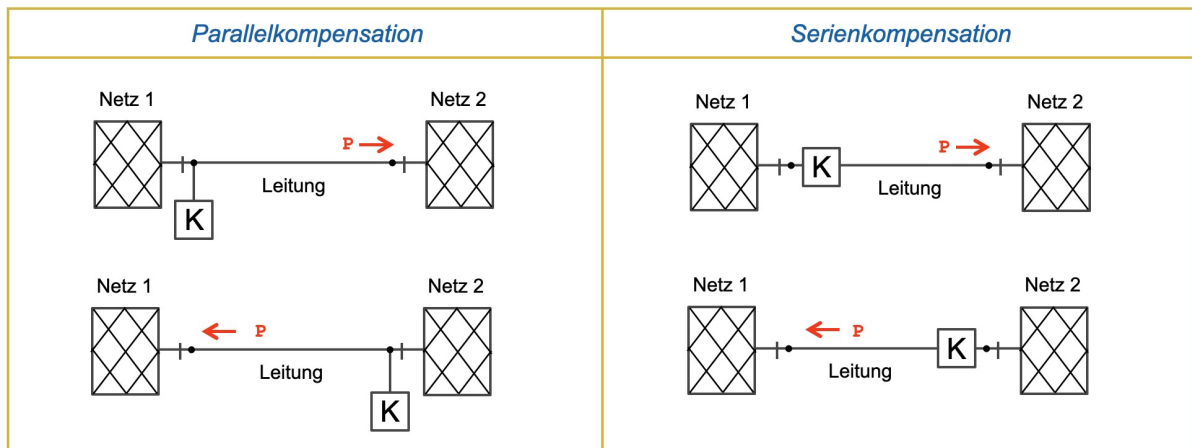
(2b) Für die Kabelstrecke gelten größere Einschränkungen:

Länge	I_{strang} [kA]	Q [MVar]	P [MW]	S [MVA]
10 km	1,91	-91	1256	1259
20 km	1,93	-181	1259	1272
30 km	1,97	-272	1266	1295
40 km	2,01	-363	1275	1326
50 km	2,08	-454	1288	1366

Bei der Kabelstrecke ist über kurze Entfernungen der Betrieb möglich, jedoch wird die thermische Grenze mit wachsendem Blindstromanteil bald überschritten.

4.3. Serienkompensation und Parallelkompensation

Die von der Leitung konsumierte (bzw. abgegebene) Blindleistung muss vom Netz bereitgestellt werden, oder von einer Kompensationsanlage.



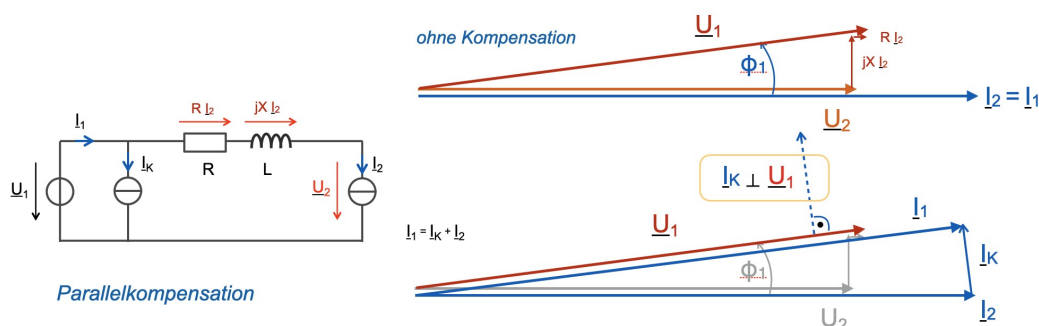
Die Abbildung zeigt unterschiedliche Methoden der Kompensation.

Frage 4.3.1: Funktionsweise. Die Kompensationsanlage stellt Blindleistung bereit, um das Netz zu entlasten. Verbessert sich hierdurch die Übertragungskapazität der Leitung? Welche Abhängigkeit besteht von der Lastflussrichtung? An welcher Stelle muss kompensiert werden? Hinweis: Verwenden Sie den Begriff „natürliche Leistung“.

Lösung: Die Eigenschaften der Leitung bleiben unverändert: Die Leitung kumuliert Blindleistung entgegen der Lastflussrichtung, da sich ihre Impedanz in dieser Richtung verändert, und zwar abhängig von der geforderten Leistung. Ist die geforderte Leistung größer als die natürliche Leistung, wird die Leitung zunehmend induktiv und nimmt zunehmend Blindleistung auf. Die Kompensationsanlage entlastet das Netz bei der Bereitstellung der Blindleistung. Die Transportkapazität der Leitung verbessert sich hierdurch nicht. Die Kompensationsanlage muss an dem Ende der Leitung aufgestellt werden, von dem aus eingespeist wird.

Frage 4.3.2: Parallelkompensation. Wie funktioniert die Parallelkompensation? Der von der Kompensationsanlage bereitgestellte Blindstrom wird den bzgl. der Impedanz kürzesten Weg nehmen. Wohin fließt der bereitgestellte Blindstrom? Erläutern Sie die Funktionsweise mit Hilfe eines Zeigerdiagramms, wobei sie (a) als Kompensationsanlage eine Stromquelle verwenden (aktive Kompensation), bzw. (b) eine Kapazität. Welche Unterschiede bestehen zwischen den Lösungen (a) und (b)?

Lösung: (1) Weg des Blindstroms der Kompensationsanlage: Weg des geringsten Widerstands, somit ins Netz. (2) Funktionsweise: Blindstrom aus dem Netz kompensieren (reduzieren bzw. eliminieren). (3) Zeigerdiagramm: siehe folgende Abbildung.



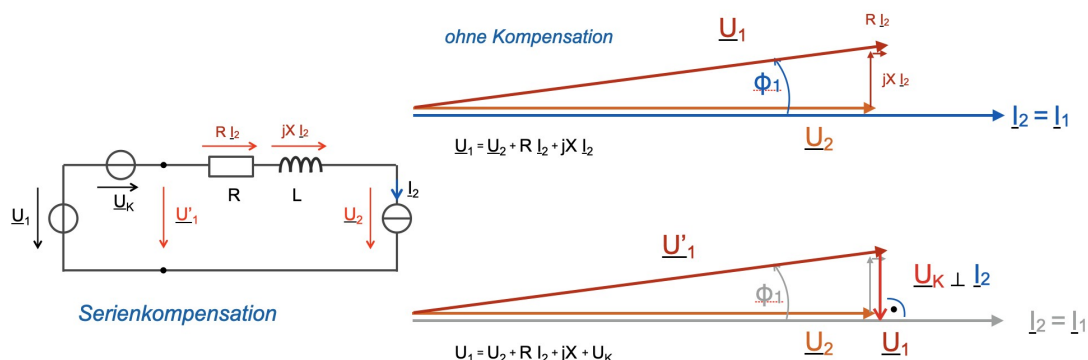
Der Strom I_K der Kompensationsanlage wird so gewählt, dass er orthogonal zur Spannung U_1 am Anschlusspunkt der Anlage steht. Auf diese Weise übernimmt der den Blindstromanteil aus dem Netz, der Strom I_1 aus dem Netz gelangt in Phase mit der Spannung U_1 am Anschlusspunkt. Auf der Übertragungsleitung ändert sich hierdurch nichts.

Realisierung als (a) Stromquelle: aktive Anlage, der Strom ist einstellbar und passt sich den Lastverhältnissen an. Als Vorgabe für die Regelung lässt sich der Blindstromanteil von I_1 vor dem Anschlusspunkt der Anlage messen. Dieser soll durch den Regler auf den Wert Null geführt werden. Die Realisierung (b) mit Hilfe einer Parallelkapazität am Anschlusspunkt funktioniert genauso: Der Strom I_K durch die Kapazität ist orthogonal zur Spannung U_1 . Soll die Anlage variabel auf die Last reagieren, muss eine Kondensatorbank variabel geschaltet werden, um Ströme I_K mit unterschiedlichen Amplituden zu realisieren.

Wichtiger Unterschied zwischen (a) und (b): Die Stromquelle (a) kann Blindstrom mit unterschiedlichem Vorzeichen generieren, somit auch eine Leitung mit kapazitivem Verhalten (im Leerlauf) kompensieren. Die passive Variante (b) wäre hierfür um geschaltete Drosselspulen zu ergänzen.

Frage 4.3.3: Serienkompensation. Wie funktioniert die Serienkompensation? Erläutern Sie die Funktionsweise mit Hilfe eines Zeigerdiagramms, wobei sie (a) als Kompensationsanlage eine Spannungsquelle verwenden (aktive Kompensation), bzw. (b) eine Kapazität. Welche Unterschiede bestehen zwischen den Lösungen (a) und (b)?.

Lösung: Der Einfluss der Leitung wird durch die eingeprägte Serienspannung kompensiert.



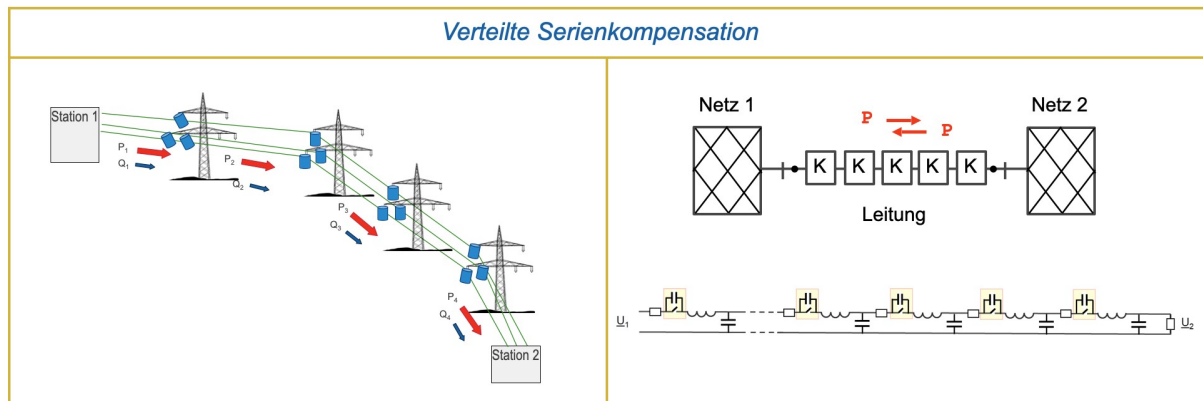
Ohne Kompensation besitzt der Strom bezogen auf die Eingangsspannung U_1 eine Blindstromkomponente, da er phasenverschoben zur Eingangsspannung ist. Mit der Kompensationsanlage bleiben die Verhältnisse am Anschlusspunkt der Leitung mit der Spannung U'_1 gleich, wie in der Abbildung dargestellt. Für die Übertragungsleitung ergibt sich durch die Kompensationsanlage kein Unterschied.

Die eingeprägte Serienspannung U_K ist orthogonal zum Strom I_2 und kompensiert den Spannungsabfall $jX I_2$ an der Reaktanz der Leitung: $U_K = -jX I_2$. Dieses Verhalten entspricht dem einer Kapazität.

Realisierung (a) als aktive Anlage mit Funktion einer Spannungsquelle: Die Anlage kann rein reaktiv ausgeführt werden (ohne Wirkleistung). Die Spannung wird orthogonal zum Leitungsstrom durch die Anlage gewählt; die Amplitude kann proportional zum Strom variieren. Bei (b) einer passiven Anlage lassen sich Kapazitäten verwenden, für variable Anlagen geschaltete Kondensatorbänke.

Frage 4.3.4: Verteilte Kompensation. Die bisher untersuchten Kompensationsanlagen wirken in Einspeiserichtung am Anschlusspunkt der Leitung. Eine variable Lastflussrichtung erfordert Anlagen an beiden Enden der Leitungen. Außerdem beeinflussen die Anlagen die Übertragungseigenschaften der Leitung nicht. Folgende Abbildung zeigt eine über die Leitung verteilte Kompensationsanlage. Beschreiben Sie die Unterschiede zu Kompensationsanlagen an den Leitungsenden. Erläutern Sie die Funktionsweise in einem Zeigerdiagramm. Realisieren Sie die

Anlage in der Tabellenkalkulation (bzw. verwenden Sie hierzu das mit diesem Skript bereitgestellte Muster, siehe [Tabellenwerk](#)) und untersuchen Sie das Verhalten.



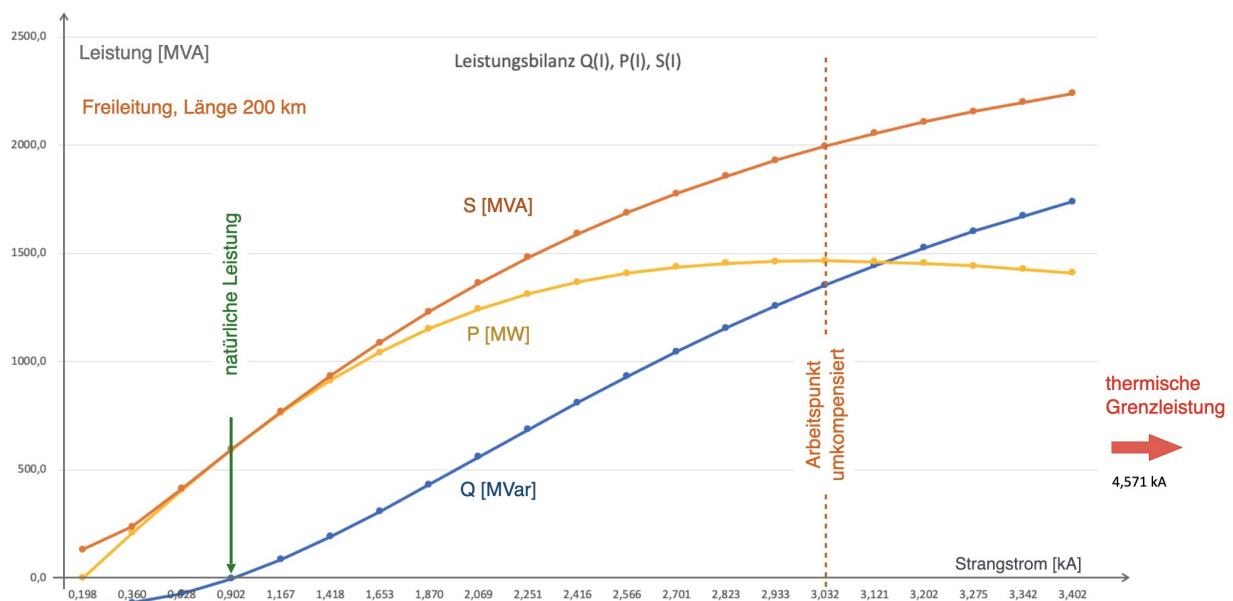
Lösung: (1) Unterschiede: (a) Die verteilte Lösung verbessert die Übertragungseigenschaften und somit die Übertragungskapazität der Leitung, da sich weniger Blindleistung über die Länge der Leitung kumuliert. (b) Die verteilte Kompensation wirkt unabhängig von der Lastflussrichtung. Allerdings ist der Aufwand wegen der Verteilung über die Leitungslänge hoch.

(2) Funktionsweise: Wie Serienkompensationsanlagen für Leitungssegmente, Zeigerdiagramm siehe Aufgabe 4.3.3. Die Serienkompensationsanlage arbeitet mit Serienkapazitäten in der Leitung, bzw. bildet dieses Verhalten als Spannungsquelle nach. Hierdurch reduziert sich die Leitungsinduktivität und somit der Wellenwiderstand der Leitung. In dieser Argumentation steigt die natürliche Leistung. Wegen der besseren Anpassung sinkt der Blindleistungsbedarf.

(3) Untersuchungen mit dem Tabellenwerk: Zur Untersuchung wurde die 380 kV Freileitung aus Aufgabe 4.1 verwendet, mit einer Länge von 200 km und mit thermischer Grenzleistung.

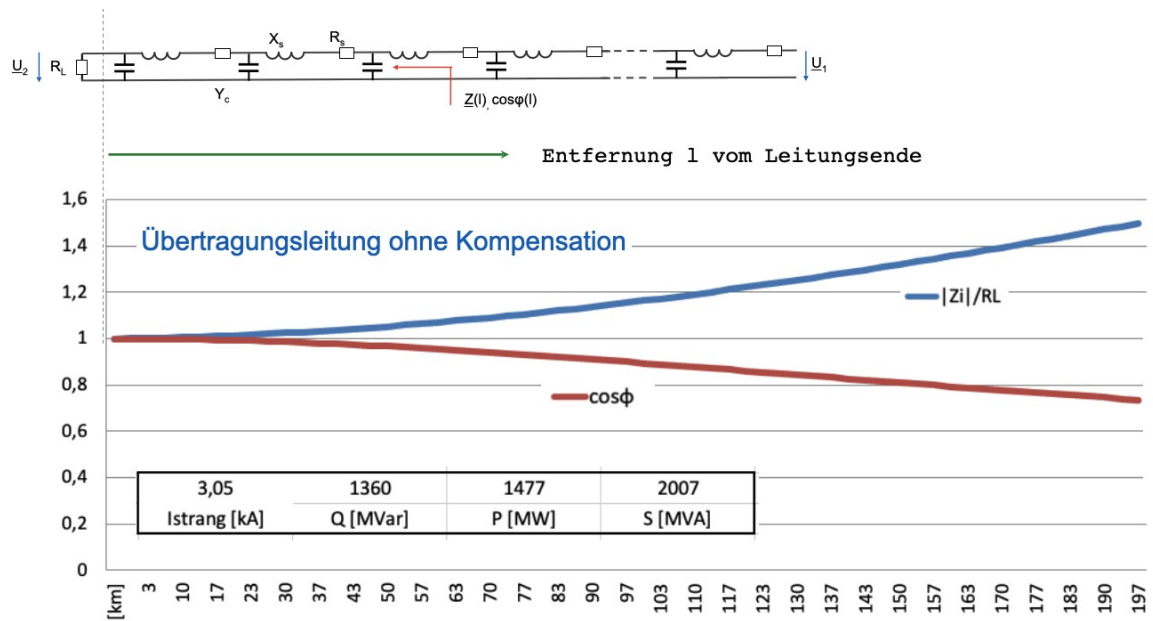
Ohne Kompensation: Über diese Entfernung kumuliert die Leitung annähernd so viel Blindleistung wie Wirkleistung, die Übertragungskapazität beträgt ca. 1500 MW.

Länge	I_{strang} [kA]	Q [MVar]	P [MW]	S [MVA]
200 km	3,05	1360	1477	2007



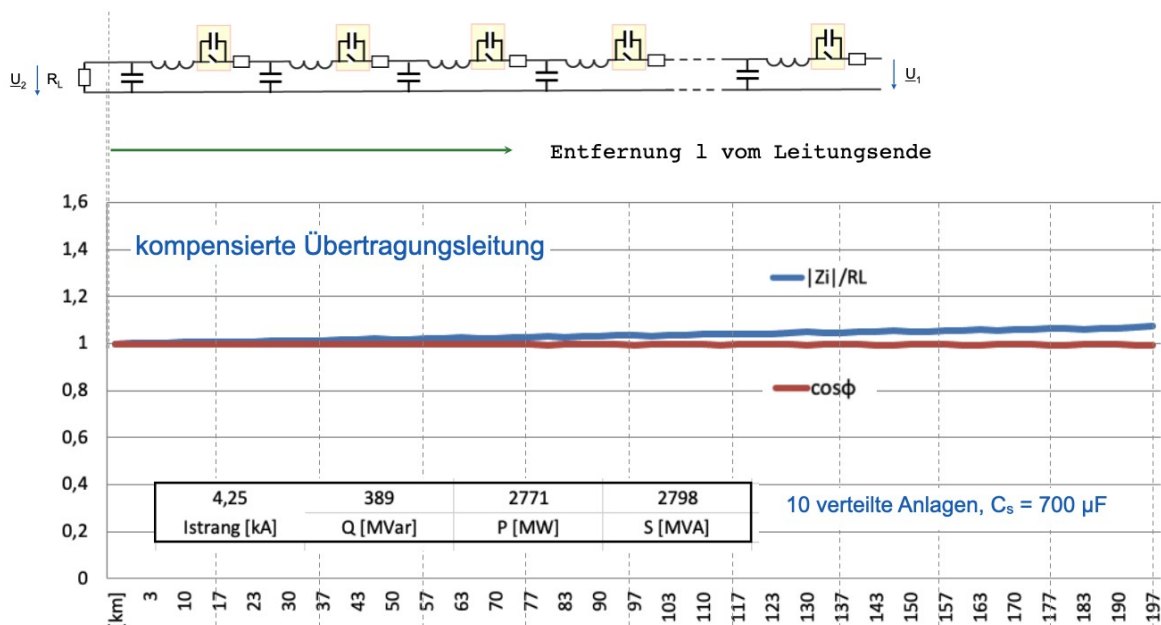
Bei dieser Leitungslänge wird die thermische Grenzleistung nicht annähernd erreicht: Die übertragene Wirkleistung beträgt die Hälfte der thermischen Grenzleistung, die Scheinleistung 2/3.

Grund ist die hohe Leitungsimpedanz, die die Stromaufnahme am Anschaltspunkt der Einspeisung begrenzt. Mit einer Stromquelle als Last ließe sich der Strangstrom bis zum thermischen Grenzwert erhöhen, jedoch verschlechtert sich hierdurch der Anteil der Wirkleistung, wie in der Darstellung oben erkennbar. Folgende Abbildung zeigt den Impedanzverlauf der unkompensierten Leitung über der Leitungslänge.



Mit Hilfe der Kompensation lassen sich die Übertragungseigenschaften wesentlich verbessern:

Länge	I_{strang} [kA]	Q [MVar]	P [MW]	S [MVA]
200 km	4,25	389	2771	2798



Die Abbildungen oben illustrieren den Verlauf der Leitungsimpedanz ohne und mit der Serienkompensation. Für die Simulation wurden 60 Leitungssegmente mit einer Länge von 3,3 km verwendet. Nach jedem 6. Leitungssegment, d.h. alle 20 km befinden sich Kompensationsanlagen in der Leitung. Insgesamt werden 10 verteilte Anlagen benötigt.

Die Kompensation bringt eine deutliche Verbesserung, wie folgende Gegenüberstellung zeigt:

Länge 200 km	I_{strang} [kA]	Q [MVar]	P [MW]	S [MVA]
unkompensiert	3,05	1360	1477	2007
kompensiert	4,25	389	2771	2798

Die Serienkompensation erlaubt nahezu die Verdopplung der Transportkapazität, die Scheinleistung entspricht annähernd der Wirkleistung. Eine Kompensationsanlage am Anfang bzw. Ende der Leitung erzielt diesen Effekt nicht.

4.4. Vertiefung als Seminararbeit

Vertiefen Sie die Untersuchung der Eigenschaften von Übertragungsleitungen in Ihrer Seminararbeit. Verwenden Sie hierzu neben dem Tabellenwerk Simulationen in PowerFactory. Erstellen Sie geeignete Netzmodelle und untersuchen Sie Lastflüsse mit dem jeweiligen Bedarf an Blindleistung. Ergänzen Sie bei Bedarf Kompensationsanlagen. Dokumentieren Sie die Ergebnisse Ihrer Untersuchung in Ihrer Ausarbeitung. Analysieren Sie die Ergebnisse durch analytische Berechnungen und durch Experimente mit der Tabellenkalkulation.

Untersuchen Sie ggf. unterschiedliche Leitungstypen, z.B. Freileitungen und Kabelstrecken. Die Untersuchungen müssen nicht auf das Übertragungsnetz (220 kV und 380 kV) beschränkt werden:

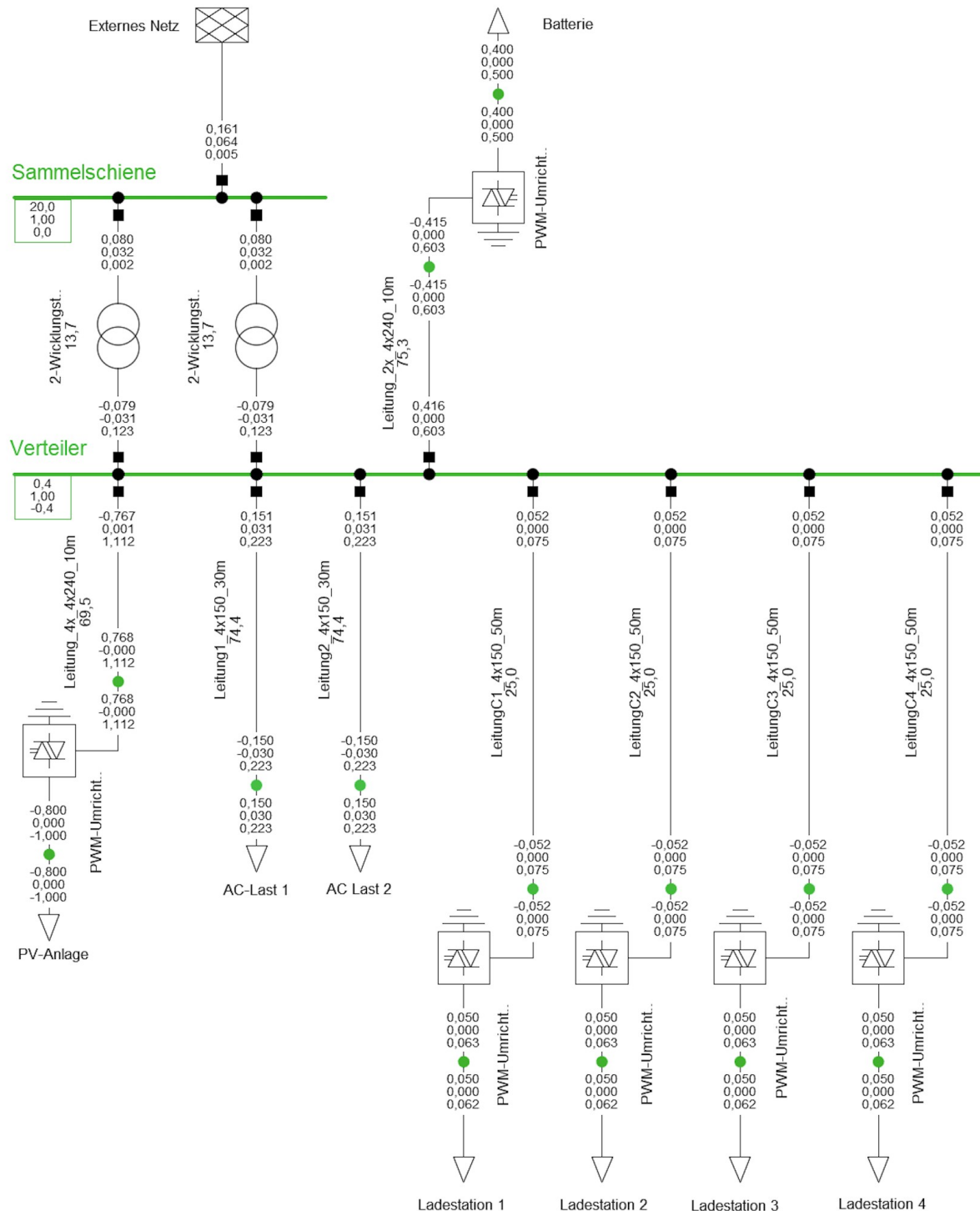
- Kabelstrecken im 20 kV Mittelspannungsnetz haben beispielsweise sehr gute Übertragungseigenschaften im Betrieb mit Wechselspannungssystemen. Grund hierfür ist die gute Anpassung, bzw. der Betrieb in der Nähe der natürlichen Leistung.
- Ebenfalls von Interesse sind 110 kV AC-Kabelstrecken zur Anbindung von Windparks (an Land und auf See). Hier wären mit Hilfe der Datenblätter der Kabel $\{R', L', C', \text{thermischer Grenzstrom bzw. thermische Grenzleistung}\}$ die Übertragungseigenschaften zu definieren und eine geeignete Strecke zu untersuchen und zu kompensieren.

Ergänzend können Sie auch Gleichspannungsstrecken im Übertragungsnetz bzw. im Verteilnetz untersuchen. Sprechen Sie bitte Ihr Thema mit dem Dozenten ab.

5. Anlagen am Netz

5.1. Gewerbezentrum

In einem Gewerbezentrum werden Anlagen versorgt, wie in folgender Abbildung dargestellt.



Zu den Anlagen gehören

- AC-Verbraucher mit 2x 150 kW

- eine PV-Anlage mit 800 kW
- ein Batteriesystem mit 400 kW Anschlussleistung und 6 h Speicherdauer
- vier Ladestationen mit jeweils 50 kW.

Die Anbindung ans Mittelspannungsnetz erfolgt über zwei 630 kVA Transformatoren.

Frage 5.1.1: Konverterverluste. Die Konverterverluste für die Wandlung von AC nach DC und umgekehrt seien mit ca. 3% bis 4% bewertet. Welche Energiemenge geht im Jahr verloren, wenn man folgende Abschätzung für die Betriebsstunden pro Jahr verwendet: Solaranlage: 1000 h, Ladestationen: 3000 h, Batteriesystem: 2000 h. Welche Energiemenge für Verluste kommt über eine Betriebsdauer von 15 Jahren zusammen?

Lösung: (1) Solaranlage: Ertrag = $1000 \text{ h} \cdot 800 \text{ kW} = 800 \text{ MWh}$. Hiervon 3% Verluste: 24 MWh.

(2) Ladestationen: Bezogene Energie = $3000 \text{ h} \cdot 200 \text{ kW} = 600 \text{ MWh}$. Hiervon 4% Verluste: 24 MWh.

(3) Batteriesystem: Energiesumme = $2000 \text{ h} \cdot 400 \text{ kW} = 800 \text{ MWh}$. Hiervon 3% Verluste: 24 MWh.

(4) Verlustenergie über 15 Jahre Betriebsdauer: $72 \text{ MWh/Jahr} \cdot 15 \text{ Jahre} = 1080 \text{ MWh}$.

Frage 5.1.2: Kosten der elektrischen Verluste. Wenn man die Energiekosten mit 0,3 Euro/kWh bewertet, wie hoch sind die Kosten für die Verluste über die gesamte Betriebsdauer bezogen auf die elektrische Leistung (d.h. in Euro/kW). Verwenden Sie das Ergebnis aus Aufgabe 5.1.1. Wie würde man die Kosten der Verluste mit den Investitionskosten vergleichen? Hinweis: Berechnen Sie die Kosten für 1% Konverterverluste. Welcher Aufpreis ist für einen Konverter möglich, der 1% weniger Verluste erzeugt?

Lösung: (1) $1080 \text{ MWh} \cdot 0,3 \text{ Euro/kWh} = 324.000 \text{ Euro}$. Bezogen auf die gesamte Anschlussleistung von 800 kW (PV) + 400 kW (Batterie) + 200 kW (Ladestationen) = 1400 kW ergibt sich bezogen auf die Anschlussleistung ein Wert von ca. 230 Euro/kW. (2) Investitionskosten und Verluste als Betriebskosten: Die mittleren Verluste nach der Rechnung betragen: $(3\% \cdot 800 + 4\% \cdot 600 + 3\% \cdot 800) / 2200 = 3,3\%$. Die Kosten für 1% Konverterverluste betragen somit $(230 \text{ Euro/kW}) / 3,3 = 70 \text{ Euro/kW}$. Ein Konverter, der 1% weniger Verluste erzeugt, darf folglich 70 Euro/kW mehr kosten.

Frage 5.1.3: Netzmodell. Bauen Sie ein vergleichbares Netz mit PowerFactory auf und untersuchen Sie die Lastflüsse und Auslastung der Betriebsmittel. Verwenden Sie repräsentative Leitungslängen und Leiterquerschnitte. Welche Arbeitspunkte sind relevant?

Lösung: siehe Abbildung. Relevante Arbeitspunkte sind: (1) Mittagszeit mit voller Solarleistung, (a) ohne Last und (b) mit voller elektrischer Last, (2) keine Solarleistung (abends bzw. bei bedecktem Himmel) und Vollast, (a) mit geladener Batterie, (b) mit leerer Batterie, (3) Inselnetzbetrieb mit Versorgung aus dem Batteriesystem, ggf. mit unterschiedlich priorisierten Lasten.

Frage 5.1.4: Aufwand der elektrischen Verteilung. Wie beurteilen Sie den Aufwand für die Kabelstrecken? Wo wird der größte Leiterquerschnitt benötigt? Wo sind die Leiterverluste am größten? Hinweis: Begründen Sie Ihre Aussagen durch die physikalischen Zusammenhänge zwischen, Strom, Spannung, Leistung und Verlustleistung.

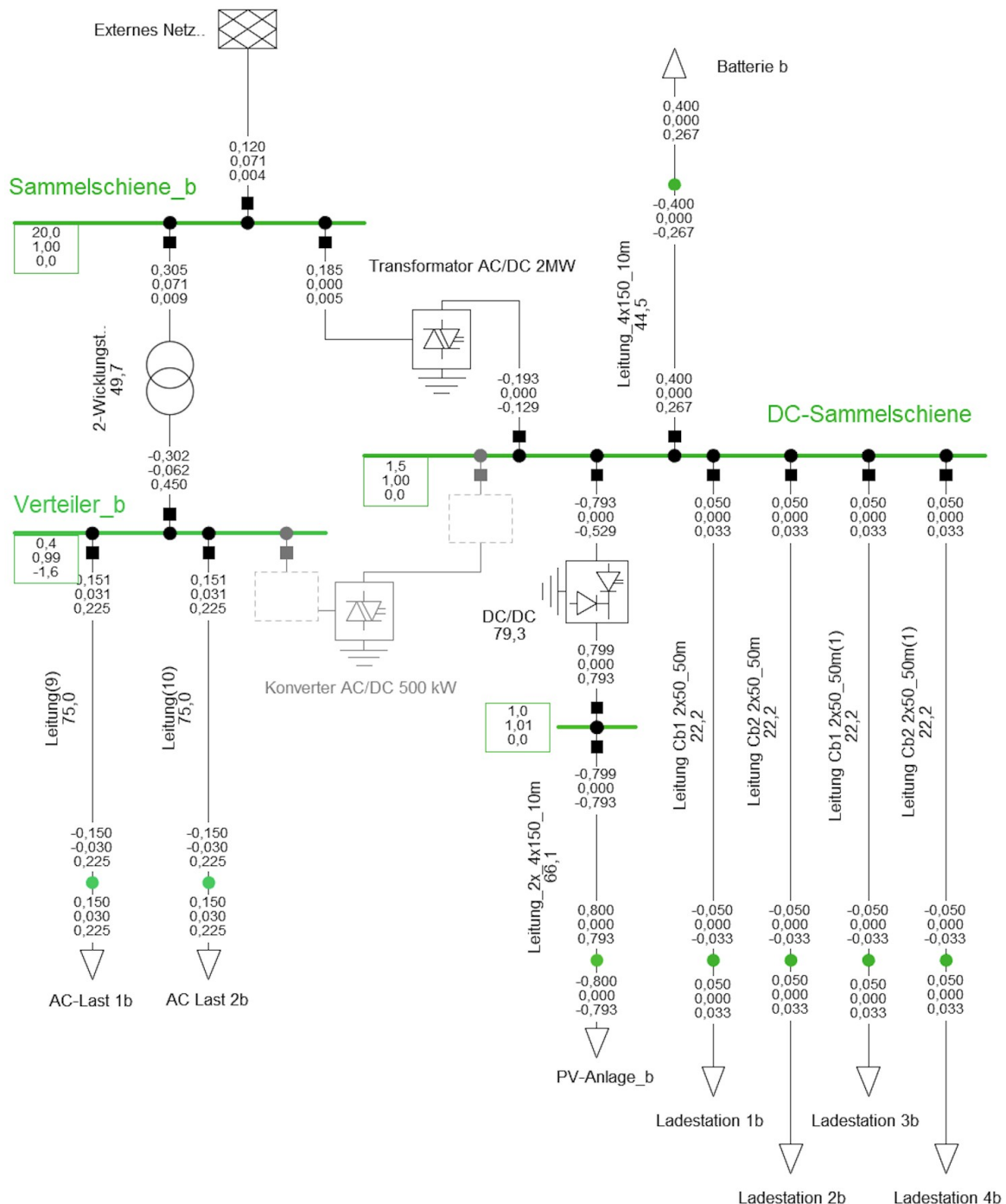
Lösung: (1) Leiterquerschnitt: Bei konstanter Spannung an der 400 V Sammelschiene folgt der Leiterquerschnitt dem Strom und somit der zu übertragenden elektrischen Leistung: $S = \sqrt{3} U I$. (1a) Die größte Leistung hat mit 800 kW die PV-Anlage: Hier beträgt der Strangstrom ca. 1,15 kA. Für mehradrige Kabel findet sich für einen Querschnitt von 240 mm² eine Strombelastung von maximal 450 A, und somit eine Stromdichte von ca. 1,9 A/mm². Für eine Kabelauslastung von 70% würden somit ca. 900 mm² benötigt, bzw. 4 Leiter pro Phase. (1b) Für das Batteriesystem mit 400 kW wird somit der halbe Leiterquerschnitt benötigt. (1c) Für die Ladestationen mit jeweils 50 kW beträgt der Strom ca. 70 A. Mit einer Kabelauslastung von ca. 50% würde hier ein Querschnitt von 50 mm² genügen. Allerdings sind die Leitungen lang, so dass zu Gunsten der Leitungsverluste ein größerer Querschnitt vorteilhaft ist.

Bemerkung: Bei kleineren Querschnitten (50 bis 70 mm²) kann die Wärme wegen des größeren Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen besser abgeführt werden, die Stromdichte beträgt ca. 3 A/mm². Bei einem Querschnitt von 150 mm² beträgt die Stromdichte ca. 2,5 A/mm², siehe z.B. [Tabelle](#).

(2) Kabelverluste: Berechnen sich pro Phase mit $P_{1,V} = I^2 R$. Mit Hilfe des Querschnitts (proportional zu $1/R$) kann man die Verluste nur linear beeinflussen: Doppelter Querschnitt halbiert die Verluste. Den größeren Hebel hätte man durch Erhöhung der Spannung: Doppelte Spannung bedeutet halben Strom und somit $\frac{1}{4}$ der Verluste.

5.2. Gleichstromsysteme am Gleichspannungsnetz

In folgender Abbildung sind DC-Anlagen direkt an eine DC-Verteilung angeschlossen.



Die Verbindung mit dem AC-Netz erfolgt über einen Mittelspannungskonverter, der als Transformator zwischen 20 kV AC und einer DC-Sammelschiene mit 1500 V DC arbeitet. Diese Spannung stellt die Grenze der Niederspannung dar. AC-Kabel, das für 1 kV AC zugelassen ist, darf in der Regel auch mit 1,5 kV DC betrieben werden. Grund hierfür ist die Isolation auf den Scheitelwert der AC-Spannung, die grob das 1,5-fache des Effektivwerts beträgt.

Die Batterie und alle Ladestationen haben einen Anschluss für 1500 V_{DC}. Die PV-Anlage hat eine Betriebsspannung von 1000 V_{DC} und ist daher über eine DC-Steller angeschlossen. Vorteilhafter zur Vermeidung von Konverterverlusten wäre auch hier ein direkter Anschluss an die DC-Verteilung.

Frage 5.2.1: Vergleich AC und DC. Worin unterscheiden sich eine Verteilung mit 400 V_{AC} von einer Verteilung mit 1500 V_{DC} bzgl. (1) Strömen, (2) Kabelaufwand und (3) Leitungsverlusten (bei gleicher Anlagenleistung)? Hinweis: Vergleichen Sie die Spannung pro Leiter, d.h. die Spannung vom Leiter zum Bezugspunkt bzw. Kabelmantel.

Lösung: (1) Ströme: Bei einer AC-Verteilung mit 400 V beträgt die Spannung vom Leiter zum Neutralleiter bzw. Sternpunkt 230 V. Diese Spannung lässt sich vergleichen mit der Spannung im DC-System, wenn man die Spannung von 1500 V von Leiter zu Leiter als System mit +750 V auf Leiter 1 und -750 V auf Leiter 2 interpretiert, bezogen auf den Kabelmantel bzw. Sternpunkt.

Somit ist die Spannung im DC-System um einen Faktor $750/230 = 3,26$ höher. Bei gleicher Leistung fallen die Ströme um diesen Faktor geringer aus. Bei gleichem Leiterquerschnitt fallen die Kabelverluste gemäß $P_V = R I^2$ um den Faktor $(3,26)^2 \approx 10$ geringer aus. Bei gleichen Verlusten ließe sich über den gleichen Querschnitt die 10-fache Leistung übertragen.

Bei gleicher Leistung lässt sich wegen der geringeren Ströme der Kabelquerschnitt um einen Faktor 3,26 verkleinern.

(2) Kabelaufwand: Wegen der um den Faktor 3,26 kleineren Ströme lässt sich pro Leiter ein um diesen Faktor geringerer Querschnitt verwenden: Statt einer Leitung mit 150 mm² genügen somit 50 mm². Außerdem ist die DC-Verteilung nur 2-phasig: der dritte Leiter entfällt. Hierdurch reduziert sich der Kabelaufwand bzw. Materialaufwand um einen Faktor $2/3 \cdot 1/3,26 = 0,2$ bzw. auf ein Fünftel.

(3) Leitungsverluste: Wenn man bei der DC-Verteilung den Kabelquerschnitt an die Stromdichte anpasst (d.h. den Querschnitt um den o.g. Faktor $k = U_{DC}/U_{AC}$ reduziert), so beträgt der ohmsche Widerstand der Leitung das k-fache: $R_{DC} = k R_{AC}$.

Bei gleicher übertragender Leistung ist der DC-Strom wegen der höheren DC-Spannung weiterhin um den Faktor k kleiner als der AC-Strom: $I_{DC} = I_{AC}/k$. Für die Verlustleistung der Leitung berechnet man: $P_{V,DC} = R_{DC} I_{DC}^2 = R_{AC} I_{AC}^2/k = P_{V,AC}/k$. Die Verlustleistung bleibt um den Faktor k geringer.

Da die DC-Verteilung nur 2 Leiter benötigt, fällt die Verlustleistung insgesamt um den Faktor $(2/3) \cdot 1/k$ geringer aus als beim AC-System mit 3 Leitungen. Mit den o.g. Wert für k betragen die DC-Verluste des Systems mit ± 750 V etwa $(2/3) \cdot 1/3,26 \approx 0,2$, somit ca. 1/5 der Verluste der 400 V AC-Verteilung.

Frage 5.2.2: Systeme gleicher Spannung. Worin unterscheiden sich eine DC-Verteilung mit gleicher Spannung wie eine AC-Verteilung? Hinweis: Gleiche Spannung bedeutet gleiche Scheitelwerte der Spannung.

Lösung: (a) Spannungsisolation: Die vergleichbare Spannung zu einem AC-System mit 400 V (bzw. 230 V zum Neutralleiter) in einem DC-System beträgt d.h. $U_{DC} = \sqrt{2} U_{AC} = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} \approx \pm 325 \text{ V}$ (= Scheitelwert des AC-Effektivwertes von U_{AC}).

(b) Die Leiterströme bleiben wegen der thermischen Belastung der Leiter gleich.

(c) Die Transportleistung des DC-Systems beträgt somit $P_{DC} = 2 \cdot U_{DC} I = 2\sqrt{2} \cdot U_{AC} I \approx 3 \cdot U_{AC} I = P_{AC}$. Die Transportleistung des DC-Systems ist annähernd gleich dem AC-System.

(d) Aufwand und Verluste: Das DC-System benötigt nur 2 Leiter statt 3, somit $\frac{2}{3}$ des Aufwandes an Kabeln. Wegen des nicht erforderlichen 3. Leiters betragen die Leitungsverluste $\frac{2}{3}$ der Verluste des AC-Systems.

Frage 5.2.3: Konverterverluste. (1) Vergleichen Sie die Verluste aus der Abbildung mit den Verlusten mit AC-Verteilung aus der Abbildung unter Aufgabe 5.1. In beiden Fällen wurden die gleichen Arbeitspunkte gewählt (alle Anlagen in Betrieb, Erzeuger, Lasten und Batterie mit maximaler Leistung). (2) Wodurch kommen die Verluste zustande, wo ergeben sich Möglichkeiten zur Einsparung? (3) Wie lassen sich die Verluste in geeigneter Weise bewerten?

Lösung: (1) Die Summe der Konverterverluste ist am Netzanschluss erkennbar: Mit der AC-Verteilung werden dem Netz 161 kW entnommen, mit der DC-Verteilung 120 kW. Der Unterschied beträgt somit 41 kW. Das sind bezogen auf die dem Netz entnommene Leistung 25%.

(2a) Ursachen: Da die Leitungsquerschnitte großzügig bemessen wurden, sind die größten Ursachen im Beispiel die Konverterverluste. Der Arbeitspunkt repräsentiert hierbei nur die aktuellen Verluste: In der Realität würde PV-Strom über den Umweg der Konvertierung nach AC in der Batterie gespeichert, hierfür werden 2 Konverter zu durchlaufen. Um den Strom über die AC-Kopplung zu den Ladestationen der Fahrzeuge zu transportieren, sind nochmals 2 Konverter zu durchlaufen. Auf diesem Weg gehen bei 3,5 % Konverterverlusten 14% der Leistung verloren.

(2b) Potenzial für Einsparungen: Einsparung der Konverter erspart die Konverterverluste, siehe Aufgabe 5.1.1. Im DC-Netz wurden folgende Verbesserungen erzielt:

- Einsparung des Batteriekonverters
- Einsparung der Konverter für die Ladestationen
- Ersatz des Konverters der PV-Anlage durch einen DC-Steller. Für PV-Anlagen mit passender DC-Spannung kann auch dieser entfallen.

Den Einsparungen gegenüber steht der zentrale AC/DC-Transformator mit Mittelspannungsanschluss. Dieses System kann effizienter gestaltet werden als die eingesparten AC/DC-Konverter für die einzelnen Systeme. Wenn die Leistungsbilanz im DC-Netz annähernd ausgeglichen ist, wird der zentrale AC/DC-Wandler kaum belastet (im Beispiel: PV-Einspeisung von 800 kW gegenüber einer Leistungsaufnahme der Batterie und Fahrzeuge von 600 kW).

(3) Bewertung der Verluste: Die Verluste lassen sich nur durch Energiebilanzen im Zeitverlauf vernünftig bewerten, z.B. in Tagesverlauf oder pro Monat bzw. pro Jahr. Hierzu sind Lastprofile und Erzeugerprofile erforderlich. Die Berechnung kann mit Hilfe eines Tabellenwerks erfolgen.

Bemerkung: Die Profile lassen sich auch im Netzmodell simulieren, mit Hilfe der quasi-dynamischen Simulation unter Verwendung von 15-Minuten-Werten für den Lastverlauf. Eine solche Simulation bietet jedoch gegenüber dem Tabellenwerk wenig Gewinn an Erkenntnissen. Einfacher ist die gezielte Simulation ausgewählter Arbeitspunkte im Zeitverlauf.

Frage 5.2.4: Netzmodell. Erstellen Sie ein vergleichbares Netzmodell und untersuchen Sie den Betrieb in unterschiedlichen Arbeitspunkten. Welche Unterschiede bestehen zur AC-Verteilung aus Aufgabe 5.1? Vergleichen Sie die Lösungen bzgl. Kabelaufwand, Kabelverlusten und Konverterverlusten. Welche neuen Anforderungen ergeben sich für das DC-Verteilnetz aus betrieblichen Gesichtspunkten?

Lösung: Abhängig vom gewählten Netz. Als Arbeitspunkte bieten sich die unter Aufgabe 5.1.3 genannten Betriebszustände an. Als Muster findet sich die Projektdatei zu den Beispielen aus Aufgabe 5.1 und 5.2 hier: [Netzmodelle](#).

Neue Anforderungen für DC-Verteilnetze: Solche Installationen existieren als Projekte, jedoch ist die Standardisierung für interoperable Systeme einschließlich der Schutzkonzepte noch in Entwicklung. Aus AC-Netzen lässt sich hierfür wenig lernen und wiederverwenden:

- Blindleistung spielt für die Spannungshaltung keine Rolle, eine Netzfrequenz zur Ableitung von Leistungskennlinien gibt es nicht.
- Die Kurzschlussleistung ist grundsätzlich nicht begrenzt, mangels Induktivitäten in der DC-Verteilung steigen Kurzschlussströme rasch an. Konverter reagieren rascher als AC-Schutzgeräte. Schutzkonzepte werden daher anders gestaltet.
- Für den Betrieb der Anlagen am Verteilnetz sind einheitliche Anschlussrichtlinien erforderlich. Wegen der grundsätzlichen Unterschiede zu AC-Netzen lassen sich diese jedoch nicht von AC-Anschlussrichtlinien ableiten.

Wegen der zunehmenden Anzahl von Erzeugern und Energiespeichern im Netz bieten sich außerdem für AC-Verteilnetze und DC-Verteilnetze grundsätzlich neue Möglichkeiten zur Gestaltung der Resilienz der Netze, der Realisierung von Flexibilitäten im Netz, sowie der automatisierten Betriebsführung, die über den Stand der Technik bei konventionellen AC-Netzen hinausgehen.

Funktionen gemäß der neuen Anforderungen für DC-Netze finden sich in der aktuellen Ausgabe des Programms zur Netzsimulation noch nicht. Jedoch lassen sich DC-Leitungen, Sammelschienen, Lasten und Konverter parametrisieren, einschließlich der Regelungskonzepte.

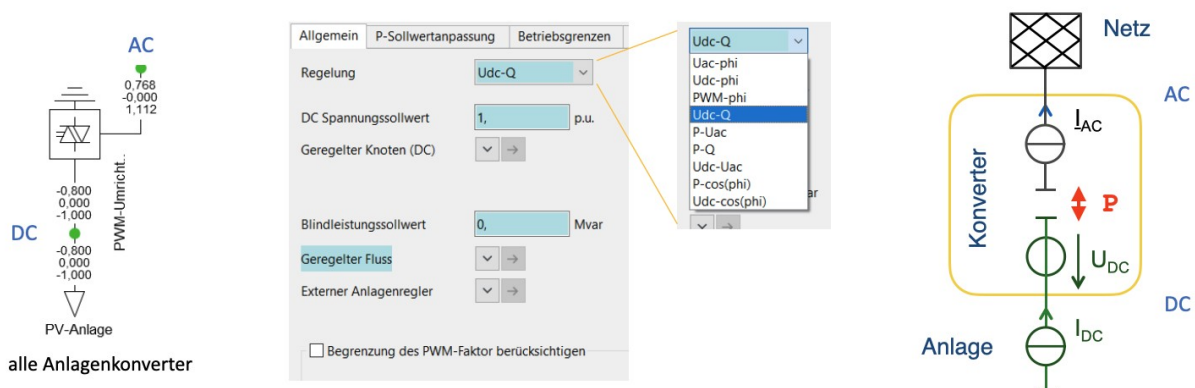
5.3. Regelungskonzepte

Konverter im Netz sind geregelt: Die Führungsgrößen müssen jeweils vorgegeben werden:

- Alle Erzeugungsanlagen und Bezugsanlagen sind am AC-Netz stromgeführt: Wird Leistung benötigt, wird der Strom so geführt, dass abhängig von der Spannung am Anschlusspunkt die gewünschte Leistung bezogen wird (bzw. eingespeist wird).
- Soll das Netz im Inselbetrieb aus der Batterie versorgt werden, so muss der Konverter die AC-Spannung bereitstellen: Er arbeitet am AC-Netz somit spannungsgeführt.

Die Betriebsweise auf der AC-Seite spiegelt sich auf der DC-Seite des Konverters: Ein Konverter, der DC-seitig an einer stromgeführten Anlage angeschlossen ist, arbeitet auf der AC-Seite ebenfalls stromgeführt. Ein Konverter, der DC-seitig an einer spannungsgeführten Anlage angeschlossen ist, arbeitet auf der AC-Seite entweder spannungsgeführt (als netzbildender Umrichter) oder stromgeführt (als Laderegler, bzw. Erzeugungsanlage oder Bezugsanlage).

Frage 5.3.1: Anlagenkonverter am AC-Netz. Folgende Abbildung zeigt die Anlagenkonverter.



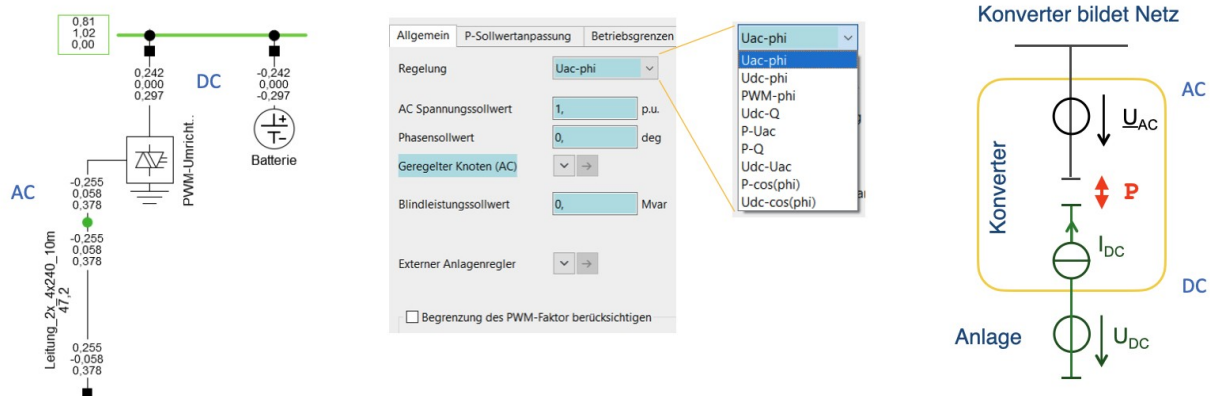
Der Konverter der PV-Anlage, der Konverter der Batterie, und alle Konverter der Ladestationen arbeiten auf die dargestellte Weise. In PowerFactory wird hierzu als Regelung „U_{DC}-Q“ ausge-

wählt. Das Kürzel beschreibt die Führungsgrößen der Regelung: (a) Die Spannung auf der DC-Seite des Konverters, (b) die Blindleistung auf der AC-Seite. (1) Erläutern Sie die Funktionsweise mit Hilfe des Diagramms rechts in der Abbildung (Ersatzschaltbild mit Stromquellen und Spannungsquellen). (2) Warum lässt sich AC-seitig die Wirkleistung nicht vorgeben? Wodurch wird die Wirkleistung AC-seitig definiert?

Lösung: (1) Funktionsweise: Alle Anlagen arbeiten DC-seitig stromgeführt. Der Konverter muss somit die DC-Spannung vorgeben. Entnimmt eine Anlage dem DC-Kreis Strom, bzw. speist sie Strom in den DC-Kreis, ändert sich hierdurch die DC-Spannung. Grund hierfür sind die Zwischenkreiskapazitäten, d.h. die Kondensatoren im DC-Kreis, die als Puffer für die Regelung dienen. Bei einer Einspeisung führt die Regelung des Konverters so viel Strom auf die AC-Seite ab, dass die DC-Spannung stabil bleibt. Auf diese Weise wird die eingespeiste Leistung auf die AC-Seite übertragen. Die Entnahme von Strom durch Verbrauchsanlagen funktioniert genauso, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen des Stroms. AC-Seite und DC-Seite des Wandlers sind durch die Wirkleistung P gekoppelt.

(2) Die Wirkleistung P wird durch die Anlage auf der DC-Seite vorgegeben und steht daher als Führungsgröße nicht explizit zur Verfügung. (3) Da der Konverter keine Energie erzeugt oder speichert, folgt die Wirkleistung auf der AC-Seite der Wirkleistung auf der DC-Seite.

Frage 5.3.2: Batteriekonverter im netzbildenden Betrieb am AC-Netz. Eine Batterie als Energiespeicher kann Leistung aufnehmen und Leistung abgeben: Sie verhält sich im DC-Netz wie eine Spannungsquelle.



Der Konverter kann die spannungsgeführte Betriebsweise auf die AC-Seite spiegeln. Hierzu wählt man die Betriebsart „ $U_{AC}\text{-}\phi$ “ aus. Das Kürzel beschreibt die Führungsgrößen der Regelung: (a) Die Spannung auf der AC-Seite des Konverters, (b) den Spannungswinkel im Bezugssystem auf der AC-Seite. (1) Erläutern Sie die Funktionsweise mit Hilfe des Diagramms rechts in der Abbildung (Ersatzschaltbild mit Stromquellen und Spannungsquellen). (2) Wodurch wird die Wirkleistung AC-seitig definiert? Woher stammt dort abgegebene oder entnommene Wirkleistung? (3) Lässt sich die Betriebsweise des Konverters auf den stromgeführten Betrieb umschalten?

Bemerkung: In PowerFactory muss für eine spannungsgeführte Batterie ein anderer Funktionsblock ausgewählt werden, da die DC-Last nur den stromgeführten Betrieb unterstützt. Daher wurde im Beispiel zusätzlich ein Block „Batterie“ eingeführt und die Stromquelle außer Betrieb genommen. In der Praxis würde man den Laderegler des Batteriesystems zwischen den Betriebsweisen „stromgeführt“ und „spannungsgeführt“ umschalten.

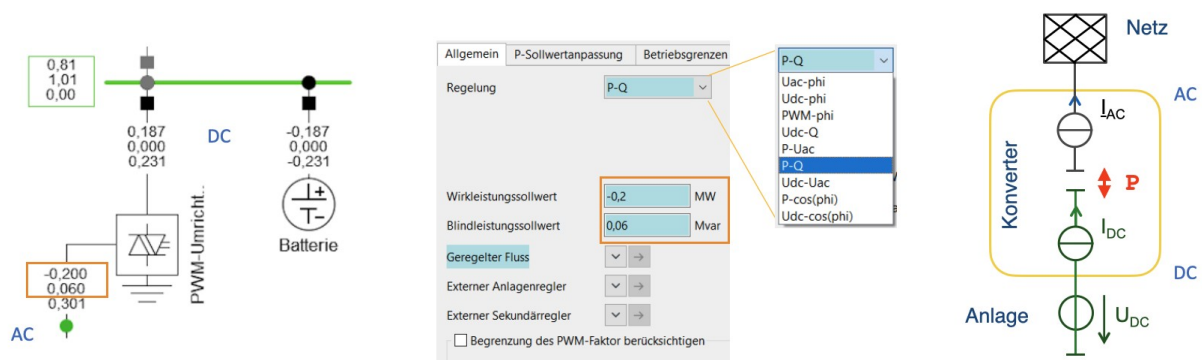
Lösung: (1) Funktionsweise: Der Konverter stellt eine Spannungsquelle dar. Ein Lastfluss findet nur statt, wenn im AC-Netz Leistung entnommen wird bzw. Leistung zugeführt wird. Die AC-Seite des Konverters ist über die Wirkleistung P mit der DC-Seite gekoppelt. Eine Leistungsentnahme auf der AC-Seite führt zu einer Entnahme der Leistung aus der DC-Seite, und umgekehrt. Die Batterie als physikalische Spannungsquelle auf der DC-Seite sorgt für die Bereitstellung bzw. Aufnahme der geforderten Leistung.

(2) Wirkleistung AC-seitig: Wird durch die Lasten im AC-System definiert, genauer durch die Summe der Lasten am Anschlusspunkt des Konverters an der Sammelschiene. Die Leistungsdifferenz nimmt das Batteriesystem auf, und zwar in beiden Lastflussrichtungen.

Eine Übersicht über das gesamte Netz in zwei unterschiedlichen Lastzuständen findet sich im Anhang „Anlagen am Netz“. In allen Fällen sorgt das Batteriesystem mit Hilfe des netzbildenden Umrichters für den lokalen Ausgleich der Leistung und entlastet somit den Austausch mit dem externen Netz.

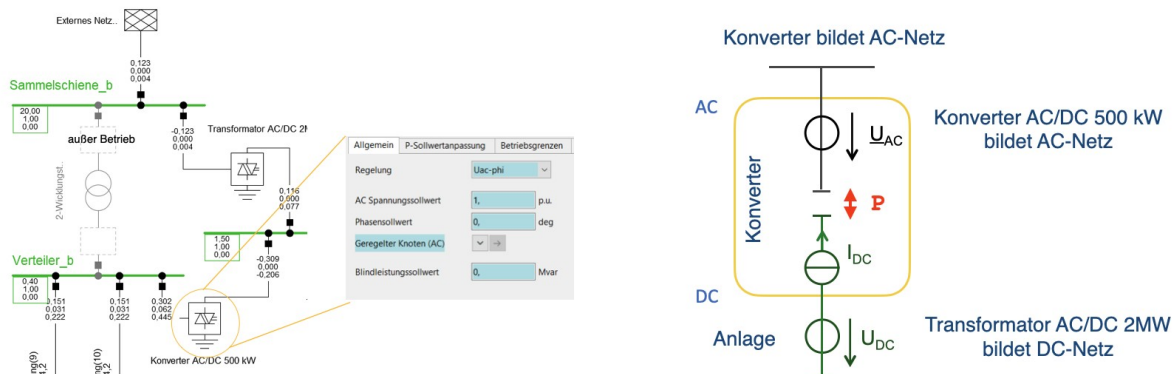
Bemerkung: Der Konverter arbeitet als Spannungsquelle parallel zu den beiden Transformatoren, die ihrerseits die Primärspannung des Netzes auf die Sekundärseite abbilden. Bei parallelen Spannungsquellen richten sich die Ströme und somit die abgegebene bzw. aufgenommene Leistung nach den Impedanzen der Spannungsquellen. Im Beispiel hat der Konverter die geringste Impedanz und übernimmt daher bei parallel arbeitenden Transformatoren die komplette Leistung. Die Transformatoren lassen sich auch außer Betrieb nehmen: In diesem Fall erfolgt die Versorgung aus dem Batteriespeicher im Inselnetzbetrieb.

(3) Stromgeführter Betrieb an der Batterie: Ja, siehe folgende Abbildung.



In diesem Fall stellt der Konverter auf beiden Seiten eine Stromquelle dar, wobei die Ströme über die Wirkleistung gekoppelt sind. Die zugehörigen Spannungsquellen finden sich (a) auf der DC-Seite durch die Batterie, (b) auf der AC-Seite als Netzspannung (bzw. deren Abbildung auf die Niederspannungsseite durch die Transformatoren).

Frage 5.3.3: Versorgung der AC-Anlagen aus dem DC-Netz. Im AC-Netz erfolgt die Versorgung über zwei Transformatoren. In der Variante mit DC-Netz findet sich nur ein Transformator. Erläutern Sie, wie die Versorgung der AC-Anlagen die Versorgung erfolgen kann, wenn dieser Transformator außer Betrieb genommen wird.



Hinweis: Verwenden Sie das in der Abbildung dargestellte Konzept.

Lösung: Zwischen AC-Netz und DC-Netz findet sich ein Konverter mit 500 kW Leistung, der zur Versorgung der beiden AC-Lasten mit insgesamt 300 kW verwendet werden kann. Wird der Transformator außer Betrieb genommen, so ist die Niederspannungsseite der AC-Verteilung ohne Spannung.

Der Konverter arbeitet somit netzbildend auf der AC-Seite. DC-seitig benötigt er hierfür eine stabile Spannung. Diese wird im Beispiel durch den leistungselektronischen Transformator (20 kV AC auf 1,5 kV DC) bereit gestellt. Die Energie muss hierfür nicht aus dem 20 kV AC-Netz bezogen werden, sondern stammt vorrangig immer aus dem DC-Netz, wie das Beispiel zeigt (vollständiges Netz siehe Anhang C). Der Vorrang ergibt sich durch die direkte Verbindung aller Gleichstromsysteme im Gleichspannungsnetz.

Bemerkung: Für umfangreichere AC-Netze über die Leistung des Konverters hinaus müssten die AC-Lasten im Sinne einer Notstromversorgung priorisiert werden.

Frage 5.3.4: Netzbildender Betrieb aus dem DC-Netz. Eine Notstromversorgung bzw. ein Inselnetzbetrieb soll komplett aus dem DC-Netz erfolgen, d.h. auch möglich sein, wenn der Transformator und der leistungselektronische Transformator außer Betrieb genommen werden und somit keine Verbindung mehr mit dem externen Netz besteht. Unter welchen Voraussetzungen ist dieser Betrieb möglich? Welche Regelung wird hierfür in den Anlagen benötigt?

Lösung: Siehe Abbildung in Anhang C, Anlagen am Netz.

Voraussetzungen: (1) Batteriesystem mit netzbildendem Umrichter als Spannungsquelle im DC-Netz. Alle anderen Anlagen im DC-Netz können stromgeführt arbeiten. (2) Netzbildender Umrichter zur Bereitstellung der Spannung im AC-Netz. Dieser Konverter stellt die Kopplung zum DC-Netz dar und arbeitet dort stromgeführt.

Regelungskonzepte: Jeweils 1 netzbildender Umrichter im DC-Netz und AC-Netz. Alle anderen Anlagen könne stromgeführt bleiben. Bei Verwendung paralleler Spannungsquellen sind Maßnahmen zum Abgleich der Spannungen erforderlich (stromabhängige Spannungskenlinien, engl. Voltage-Droop-Kennlinien).

5.4. Vertiefung als Seminararbeit

Bauen Sie ein Modellnetz mit Batteriespeichern, AC-Anlagen und DC-Anlagen am AC-Netz auf. Wahlweise verbinden Sie DC-Anlagen direkt über ein DC-Netz und koppeln über Konverter an das AC-Netz. Verwenden Sie das in diesem Abschnitt dargestellte [Beispiel als Muster](#).

Von Interesse für die Untersuchung sind:

- die Auslegung der Leitungen und Konverter,
- die Betrachtung der Verluste,
- Möglichkeiten zur Verringerung der Verluste,
- der Einsatz von Batteriespeichern hierfür, sowie zur Entlastung des vorgelagerten Netzes,
- Betrachtung unterschiedlicher Arbeitspunkte,
- Untersuchung der Regelungskonzepte der Konverter,
- mögliche Ausbauszenarien für die Netze.

Untersuchen unterschiedliche Arbeitspunkte der Anlagen. Grundsätzlich sind Sie nicht auf die Niederspannung festgelegt, wenngleich sich hier die meisten Anwendungsfälle finden werden. Sprechen Sie Ihr Thema bitte mit dem Dozenten ab.

6. Musternetz

...

6.1. Niederspannung

...

Frage 6.1.1: Ortsnetz Stadt

Lösung: ...

Frage 6.1.2: Ortsnetz Land

Lösung: ...

Frage 6.1.3: Industriebetrieb

Lösung: ...

Frage 6.1.4: ...

Lösung: ...

6.2. Mittelspannung

...

Frage 6.2.1: PV-Anlage

Lösung: ...

Frage 6.2.2: Industrienetz

Lösung: ...

Frage 6.2.3: Energiespeicher

Lösung: ...

Frage 6.2.4: ...

Lösung: ...

6.3. Hochspannung

...

Frage 6.3.1: Windpark

Lösung: ...

Frage 6.3.2: Windpark MVDC

Lösung: ...

Frage 6.3.3: ...

Lösung: ...

Frage 6.3.4: ...

Lösung: ...

6.4. Höchstspannung

...

Frage 6.4.1: Übertragungsleitung und Kompensation

Lösung: ...

Frage 6.4.2: Lastflussregler

Lösung: ...

Frage 6.4.3: HGÜ

Lösung: ...

Frage 6.4.4: Kraftwerksbetrieb

Lösung: ...

Englisch - Deutsch

Active power	Wirkleistung
Apparent power	Scheinleistung
Capacitor	Kapazität
Circuit breaker	Leistungsschalter
Current source converter	Umrichter mit Stromzwischenkreis
Line voltage	Leiter-zu-Leiter Spannung (Effektivwert)
HVDC (High Voltage DC)	HGÜ (Hochspannungsgleichstromübertragung)
Inductor	Induktivität
Nominal power	Nennleistung
Nominal voltage	Nennspannung
Peak value	Spitzenwert
Phase voltage	Leiter-zu-Nullleiter Spannung (Effektivwert)
PLL (Phase Locked Loop)	Phasenregelkreis
Power Converter	Leistungswandler
Reactive power	Blindleistung
Rectifier	Gleichrichter
Resistor	Widerstand
RMS Value	Effektivwert
Statcom	Static Synchronous Compensator, Kompensationsanlage
THD (Total harmonic distortion)	Klirrfaktor, Verzerrungsgehalt bzw. Oberschwingungsgehalt
Transformer	Transformator
Transmission	Übertragung
UPFC	Unified Power Flow Controller, Lastflussregler
VCO (Voltage controlled oscillator)	spannungsgesteuerter Oszillator
Voltage source	Spannungsquelle
Voltage source converter	Umrichter mit Spannungszwischenkreis
...	
...	

Abkürzungen

AC	Alternating Current, Wechselstrom
DC	Direct Current, Gleichstrom
$T = 1/f$	Schwingungsdauer, Periodendauer [s]
$f = 1/T$	Frequenz, Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit [1/s]
$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung [1/s]
E	Energie [Joule, J, Nm, Ws, $\text{kg m}^2/\text{s}^2$] potentielle Energie $E_p = 1/2 k y^2$, kinetische Energie, Translation $E_k = 1/2 m v^2$, kinetische Energie, Rotation $E_r = 1/2 J \omega^2$, Energie elektrisches Feld $E_C = 1/2 C U^2$, Energie magnetisches Feld $E_L = 1/2 L I^2$
RMS	Root mean square (Effektivwert)
Z	komplexer Widerstand (Impedanz, impedance)
R	Wirkwiderstand (resistance)
X	Blindwiderstand (Reaktanz, reactance)
Y	komplexer Leitwert (Admittanz, admittance)
G	Wirkleitwert (conductance)
B	Blindleitwert (susceptance)
S	Scheinleistung (apparent power, in VA = Volt Ampere)
P	Wirkleistung (power, in Watt)
Q	Blindleistung (reactive power, in Var = Volt ampere reactive)
A	Ampere
deg	degrees (Phasenwinkel in Grad)
kV	Kilo Volt (1000V)
kVA	Kilo Volt Ampere (Scheinleistung S, zur Unterscheidung von kW = Wirkleistung))
kVar	Kilo Volt Ampere reactive (Blindleistung, Q)
HS	Hochspannung
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
p.u.	per unit (auf Nennwert und physikalische Einheit normierte Größe)
PV	Photovoltaik
U_{CE}, U_{SD}	Kollektor-Emitter-Spannung, bzw. Source-Drain-Spannung bei Transistoren
W	Watt (Wirkleistung, P)

Literatur

- (1) Klaus Heuck, Klaus-Dieter Dettmann, Detlef Schulz: Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, 8. Auflage, 2010, ISBN 978-3834807366
- (2) Adolf J. Schwab, Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende, Springer Vieweg; 6. Auflage, 2020, ISBN: 978-3662603734
- (3) Volker Quaschnig, Regenerative Energiesysteme; Technologie - Berechnung – Klimaschutz; Carl Hanser Verlag München, 10. Aktualisierte und erweiterte Auflage, 2019, ISBN 978-3-446-46113-0
- (4) Christian Seynowoldt, Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien, Technik, Märkte, kommunale Perspektiven, 2. Auflage, 2021, Springer, 978-3-658-33733-9, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33733-9>
- (5) Günther Brauner, Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung; Strategien für effiziente Energieversorgung bis 2050; Springer, 2019, ISBN 978-3-658-24854-3
- (6) Michael Sterner und Ingo Stadler, Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration; Springer, 2. Auflage, 2017, ISBN 978-3-662-48893-5
- (7) VDE, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V, Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung), 17.05.2018.
- (8) Jeffrey D. Sachs: Wohlstand für viele: Globale Wirtschaftspolitik in Zeiten der ökologischen und sozialen Krise, Pantheon Verlag, 2010, 978-3570551172 (engl. Titel: Common Wealth: Economics for a Crowded Planet)
- (9) Bronstein, Semendjajew, et al.: Taschenbuch der Mathematik, Harri Deutsch, 2000, ISBN 3-8171-2005-2
- (10) Horst Kuchling, Taschenbuch der Physik; Hanser Verlag GmbH & CO. KG; 20. aktualisierte Auflage (2010), ISBN-13: 978-3446424579

Anhang A – Lastflussregler (UPFC)

Bedienung des Tabellenwerks

Das Tabellenwerk findet sich unter: https://www.srupp.de/ENT/HV_UPFC_Simulation.xlsx

Die Bedienung und die Simulation der Betriebsarten findet sich auf dem ersten Arbeitsblatt. Die Benutzeroberfläche besitzt folgende Struktur:

Set operation mode

UPFC	1	0 = off
		1 = on
		2 = reactive
		3 = PST
Voltage	Phase angle	4 = manual operation
8000	79,95	

Load settings

Assumptions:	
Station:	1000 MVA
Load:	800 MW
No of lines	2
Load per line	400 MW (3phase)
Total load	800 MW
cos(φ)	1

Grid including voltage levels

Load and UPFC status

	P (MW)	cos(φ)	Q (MVar)	S (MVA)
Line 1				
80%	391,09	0,98	83,13	399,83
Line 2				
80%	391,43	0,98	83,20	400,17
UPFC				
	-7,19	0,19	-37,12	-37,81
Voltage	Phase angle			
12000	67,0			

Im unteren Bereich links lässt sich der Lastfluss vorgeben. Diese Einstellung wurde für ein 220 kV-System mit 80% Auslastung vorgegeben und kann unverändert bleiben.

In der Mitte der Darstellung findet sich der Stromlaufplan mit den wichtigsten Kenngrößen: Spannungen an den Stationen 1 und 2, sowie darunter die Impedanzen der beiden Leitungen (gemessen an den Stationen 1 und 2 und somit einschließlich des Lastflussreglers).

Das Fenster rechts enthält die Auslastung der Leitungen bezogen auf die thermische Grenzleistung, die Leistungen (Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung) beider Leitungsabschnitte, sowie die vom Lastflussregler bereitgestellte Wirkleistung und Blindleistung. Diese ist abhängig von der Betriebsart.

Auswahl der Betriebsart

Die Auswahl der Betriebsarten erfolgt im grünen Eingabefeld links oben. Folgende Betriebsarten stehen zur Wahl:

UPFC	1	0 = off
		1 = on
		2 = reactive
		3 = PST
Voltage	Phase angle	4 = manual operation
8000	79,95	

*) PST: Phase shift transformer

- UPFC aus: Eingabe "0"
- UPFC ein: Eingabe "1"
- UPFC ein im reaktiven Betrieb: Eingabe "2"
- UPFC ein im PST - Betrieb: Eingabe "3"
- UPFC in manueller Betriebsweise: Eingabe "4"

(plus Werte für Betrag und Phasenwinkel der eingepägten Spannung $\underline{U}_x$ in den diesbezüglichen Feldern links unten)

Übersicht über die Betriebsarten mit Zeigerdiagrammen

Die Betriebsarten unterscheiden sich durch die Wahl des Spannungswinkels der eingepägten Spannung $\underline{U}_x$. Es gelten hierbei:

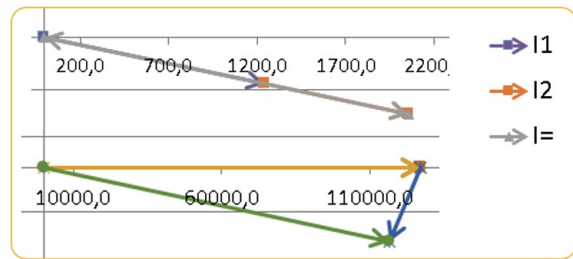
- (0) UPFC aus: keine eingepägte Spannung

- (1) UPFC ein: Spannungswinkel reduziert Leitungsimpedanz. In diesem Fall wird durch die Spannungsquelle (= Seriensystem) Wirkleistung eingespeist (bzw. entnommen), die durch das Parallelsystem (= Stromquelle) entnommen wird (bzw. eingespeist wird).
- (2) UPFC im reaktiven Betrieb: $\underline{U}_x$ wird orthogonal zum Leitungsstrom $\underline{I}_2$ vorgegeben. Hierdurch wird nur Blindleistung bereitgestellt (bzw. abgeführt). Das Parallelsystem kann entfallen bzw. auf eine Versorgung des Seriensystems für Betrieb einschließlich der Verluste.
- (3) UPFC im Betrieb als Phasenschiebertransformator: $\underline{U}_x$ wird orthogonal zum Spannung $\underline{U}_1$ vorgegeben. Diese Betriebsart ist konstruktionsbedingt bei Phasenschiebertransformatoren realisiert und funktioniert gut bei vorwiegend reaktiver Leistung (bzw. großem Verhältnis X/R). Diese Betriebsart ist jedoch mit einem Wirkleistungsfluss verbunden. Für eine leistungselektronische Implementierung würde man Betriebsart (1) vorziehen (Spannungswinkel an die Leitungsimpedanz angepasst).
- (4) Manueller Betriebsart des UPFC mit Vorgabe von Betrag und Phase der Spannung $\underline{U}_x$. Diese Betriebsart eignet sich für Experimente mit dem Tabellenwerk.

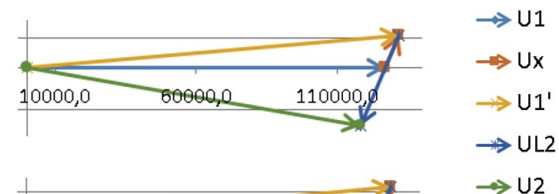
Folgende Abbildung zeigt die Betriebsarten zusammen mit den Zeigerdiagrammen.

Simulation

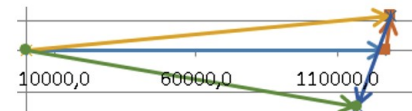
- UPFC off
 - $\underline{U}_x = 0$
 - Voltage drop $\underline{U}_{L2}$ at line impedance
 - Here: Mostly reactive $X/R = 5,2$



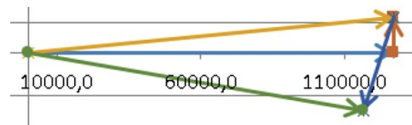
- UPFC on
 - $\underline{U}_x$ partially compensates $-\underline{U}_{L2}$



- UPFC reactive mode
 - $\underline{U}_x \perp \underline{I}_2$



- UPFC in Phase Shift Transformer mode
 - $\underline{U}_x \perp \underline{U}_1$



Hinweis: Das Tabellenwerk zeigt auf dem Arbeitsblatt „Computer“ ein Zeigerdiagramm zusammen mit den Excel-Berechnungen.

Anhang B – Freileitungen und Kabelstrecken

Komplexe Zahlen in der Tabellenkalkulation

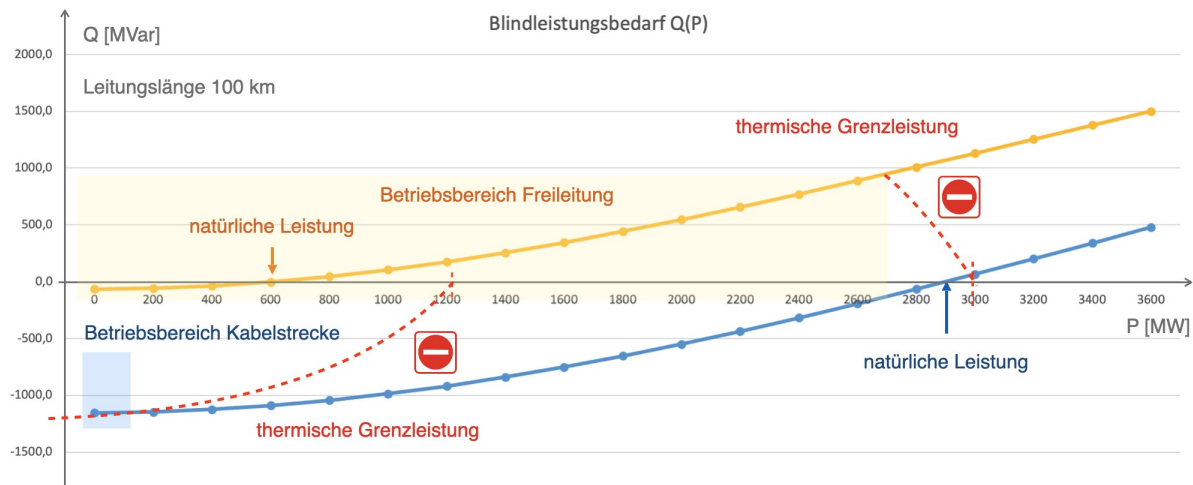
IMABS	Liefert den Absolutbetrag (Modul) einer komplexen Zahl
IMAGINÄRTEIL	Liefert den Imaginärteil einer komplexen Zahl
IMAPOTENZ	Potenziiert eine komplexe Zahl mit einer ganzen Zahl
IMARGUMENT	Liefert den Winkel im Bogenmaß zur Darstellung der komplexen Zahl in trigonometrischer Schreibweise
IMCOS	Liefert den Kosinus einer komplexen Zahl
IMDIV	Liefert den Quotienten zweier komplexer Zahlen
IMEXP	Liefert die algebraische Form einer in exponentieller Schreibweise vorliegenden komplexen Zahl
IMKONJUGIERTE	Liefert die konjugiert komplexe Zahl zu einer komplexen Zahl
IMLN	Liefert den natürlichen Logarithmus einer komplexen Zahl
IMLOG10	Liefert den Logarithmus einer komplexen Zahl zur Basis 10
IMLOG2	Liefert den Logarithmus einer komplexen Zahl zur Basis 2
IMPRODUKT	Liefert das Produkt zweier komplexer Zahlen
IMREALTEIL	Liefert den Realteil einer komplexen Zahl
IMSIN	Liefert den Sinus einer komplexen Zahl
IMSUB	Liefert die Differenz zweier komplexer Zahlen
IMSUMME	Liefert die Summe komplexer Zahlen
IMWURZEL	Liefert die Quadratwurzel einer komplexen Zahl
KOMPLEXE	Wandelt den Real- und Imaginärteil in eine komplexe Zahl um

Muster für die Tabellenkalkulation

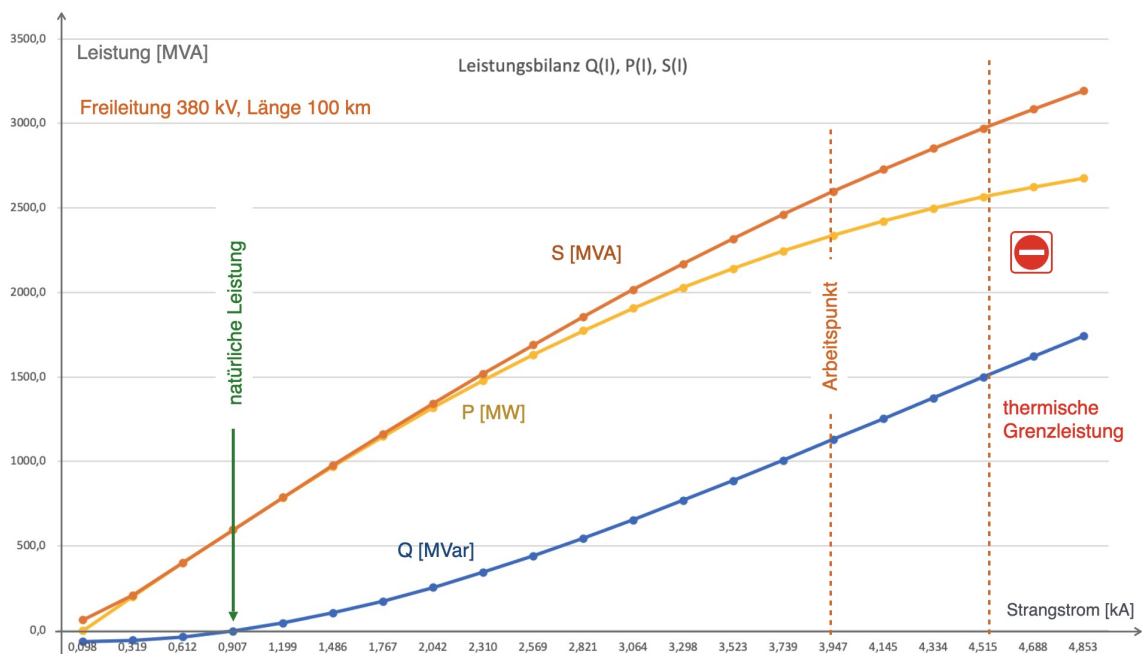
Kenngrößen	Freileitung	Kabel			
Un=	380	380	kV		
R'=	13,8	10,8	mOhm/km		
L'=	0,8	0,6	mH/km		
C'=	14,2	245	nF/km		
Stherm=	3000	1250	MVA	Grenzleistung	
Istrang=	4558	1899	A		
RW=	237	49,5	Ohm		
Pnat=	608	2918	MW		
X'=	251	188	mOhm/km		
X/R =	18	17			
Faktor Stherm/Pnat	4,9	0,4	bei Betrieb mit thermischer Grenzleistung		
Beispiel für PI-Ersatzschaltung:					
d=	100	100	km		
R=	1380	1080	mOhm		
L=	80	60	mH		
C=	1420	24500	nF		
Betrieb	Eingabefelder in Grün:				
Lastwiderstand RL =	48	115,0	Ohm		
Scheinleistung:	3008	1256	MVA		
Strangstrom:	4,571	1,908	kA		
Faktor Sn/Pnat:	4,9	0,4			
PI-Ersatzschaltbild Freileitung:					
YL'=	0,0208333333333333+0,000223053078404875i		Betrag (Ω)	Phase (rad)	cos(φ)
ZL'=	47,9944983827309-0,513855389316765i		47,9972491	-0,01070614	0,99994269
ZL''=	49,3744983827309+24,6188858394015i		55,1718282	0,462539325	0,89492228
YL''=	0,0162206385019687-0,00808786034496377i		0,01812519	-0,46253933	0,89492228
Y1=	0,0162206385019687-0,00786480726655889i		0,01802677	-0,45146583	0,89980855
Z1=	49,9151388782039+24,2020649749976i		55,4730659	0,451465833	0,89980855
Blindleistung Q1:	505,6	Mvar			
PI-Ersatzschaltbild Kabel:					
YL'=	0,00869565217391304+0,0038484510006475i		0,0095092	0,416659543	0,91444595
ZL'=	96,1643103942519-42,5596182047836i		105,161284	-0,41665954	0,91444595
ZL''=	97,2443103942519-23,7100622832448i		100,093071	-0,23915335	0,97153888
YL''=	0,00970635493585206+0,00236659892120471i		0,0099907	0,239153347	0,97153888
Y1=	0,00970635493585206+0,00621504992185221i		0,01152563	0,569531166	0,84215388
Z1=	73,0679192422978-46,785922086918i		86,763145	-0,56953117	0,84215388
Blindleistung Q1:	-170,3	Mvar			

Leistungsbilanz der Leitung

Aus dem Modell lässt sich abhängig von der Leistung P der Blindleistungsbedarf $Q(P)$ ermitteln. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel aus dem Tabellenwerk.



Die thermischen Grenzbereiche und die Leistungsbilanz insgesamt lassen sich einfacher in Abhängigkeit des Strangstroms ablesen, also $Q(I)$, $P(I)$ und $S(I)$. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel aus dem Tabellenwerk nur für die Freileitung (ohne Kabelstrecke).



Kettenmodell der Leitung

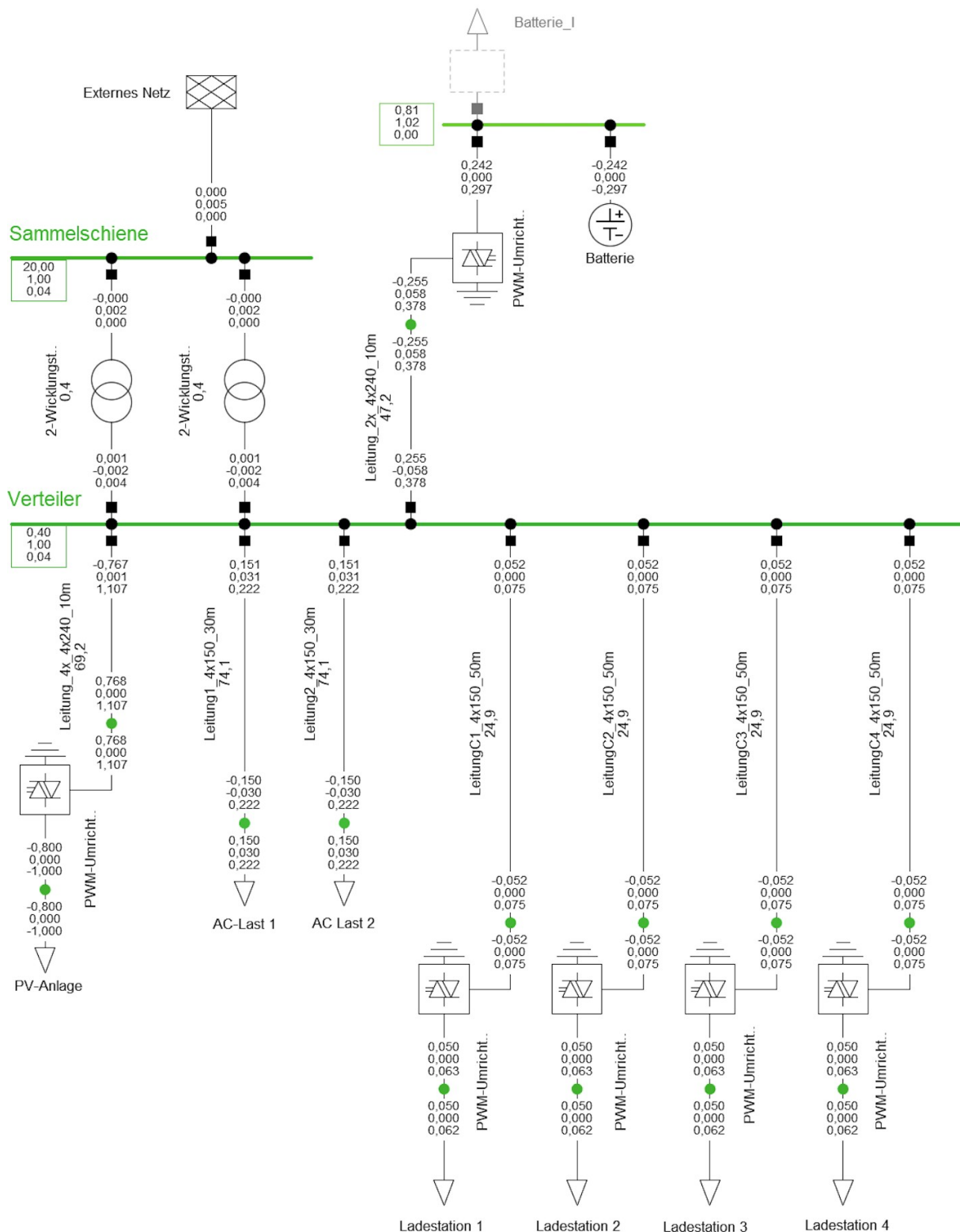
Ein Muster des Tabellenwerkes zu den Leitungen findet sich hier:

https://www.srupp.de/ENT/Berechnungen_zu_Leitungen.xlsx

Beim Kettenmodell lässt sich die Länge der Leitungselemente vorgeben, es werden bis zu 60 Leitungselemente verkettet.

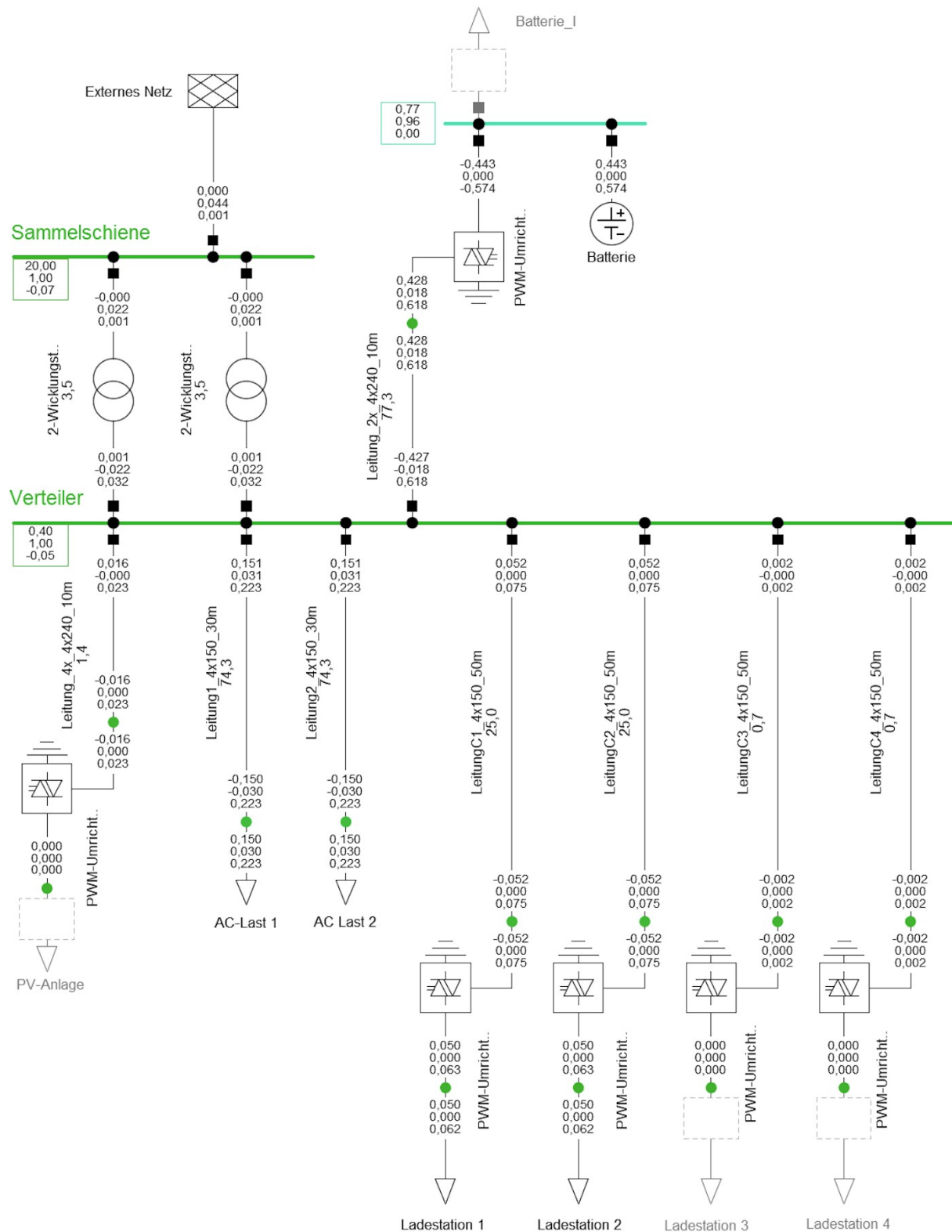
Anhang C – Anlagen am Netz

AC-Netz mit netzbildendem Konverter als lokaler Speicher



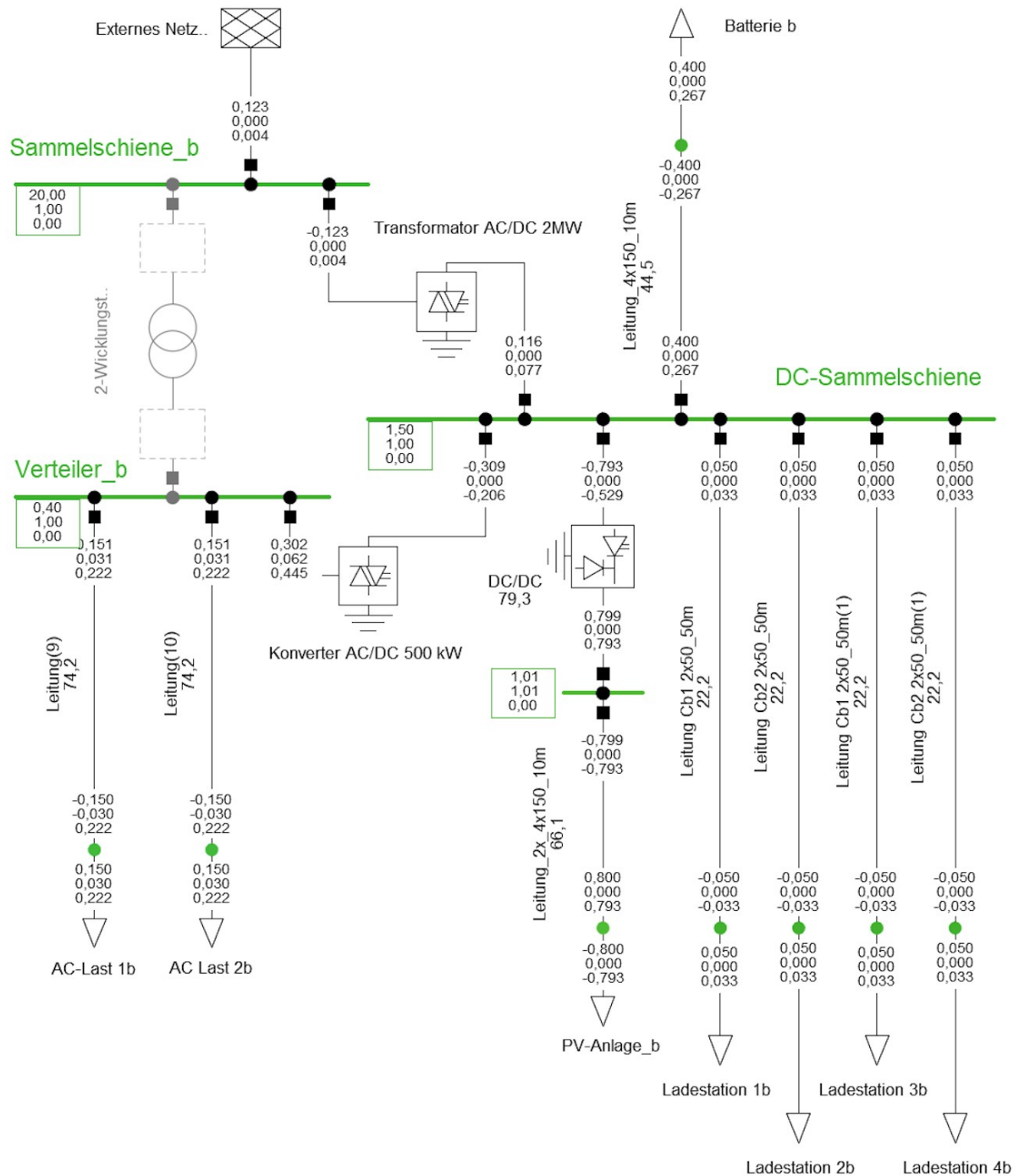
Transformatoren und Batterie-Konverter als parallele Spannungsquellen - Batterie nimmt Leistung auf

AC-Netz mit netzbildendem Konverter zur Versorgung aus dem Speicher



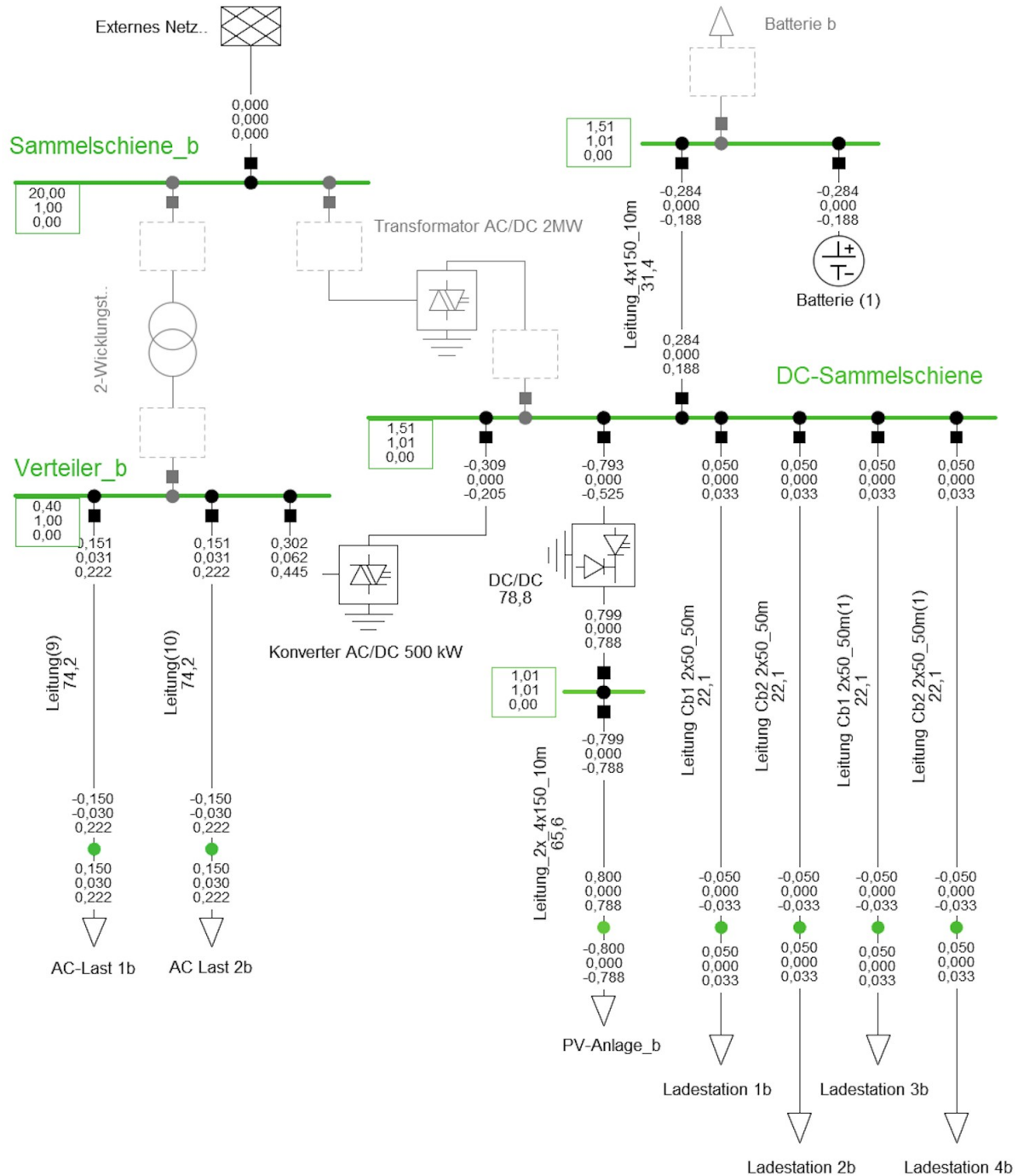
Transformatoren und Batterie-Konverter als parallele Spannungsquellen - Batterie gibt Leistung ab

Versorgung der AC-Anlagen aus dem DC-Netz



Konverter AC/DC 500 kW bildet das AC-Netz und versorgt sich aus dem DC-Netz

Inselnetzbetrieb aus dem DC-Netz



Es besteht keine Verbindung mehr zum externen Netz, alle AC-Anlagen und DC-Anlagen werden mit Hilfe des Batteriespeichersystems versorgt.

Anhang D – Musternetz

Niederspannung

...

Mittelspannung

...

Hochspannung

...

Höchstspannung

...